

科学技術動向

2003

5

No.26

科学技術トピックス

▶ ライフサイエンス分野

- ①低温（クライオ）電子顕微鏡法による、細胞内小器官の3次元立体構造の観察
- ②全米科学アカデミーが極地生物のゲノム解析プロジェクトを計画

▶ 情報通信分野

- ①超広帯域（UWB）無線による通信の実験が行なわれる

▶ 環境分野

- ①米国エネルギー省によるCO₂地中貯留フィールドテストが行われる

▶ ナノテク・材料分野

- ①米国材料系学会は材料のナノ構造制御やバイオケミカル研究に注目

▶ エネルギー分野

- ①マグネシウム蓄電池のプロトタイプシステムが開発される
- ②低温作動固体酸化物形燃料電池で1kW発電に成功、世界最高レベルの発電効率が達成される

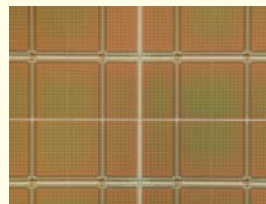
▶ 製造技術分野

- ①岩手大学の金型技術研究施設が北上市の寄付によりオープン

特集1 エピジェネティック・がん研究の必要性
—ポストゲノム時代のがん研究—

特集2 RFIDの動向

特集3 革新的原子炉としての
高温ガス炉の研究開発動向



科学技術トピックス

ライフサイエンス分野

5

①低温（クライオ）電子顕微鏡法による、細胞内小器官の3次元立体構造の観察

マックスプランク研究所の研究チームはこのほど、生きた細胞を急速凍結し、一切の前処理なしに低温（クライオ）電子顕微鏡に挿入してその内部構造をトモグラフィ（電子顕微鏡内で試料を傾斜してあらゆる方向から像を撮影し、それらの像を全て足し合わせて元の3次元像を復元する方法）で可視化するという画期的な技術を開発した。それにより、細胞内でのアクチン・フィラメントの走行や小胞体膜に結合したリボソーム、そしてプロテアソームなどの小器官の姿をin situで捉えることに成功した。細胞生物学者にとってこれまで夢であった細胞内蛋白質ダイナミクスの直接観察も十分に実現可能な射程に入ってきたようである。

②全米科学アカデミーが極地生物のゲノム解析プロジェクトを計画

全米科学アカデミーは2003年2月7日に極地生物のゲノム解析計画に関するレポートを発表した。この計画は、極地の生物が環境とどのように影響しあっているかをゲノムレベルで解析しようとするものであり、この研究により進化的な適応のメカニズムが解明され、潜在的に有用な遺伝子が見出されるなどの成果が得られると期待されている。日本においても、極限環境微生物、深海生物等の研究が活発に行なわれているが、南極、北極等の生物のゲノム研究については、ほとんど行なわれていないと思われる。極地生物のゲノム解析は興味ある研究である。

情報通信分野

6

①超広帯域（UWB）無線による通信の実験が行なわれる

これまでとは方式が全く異なる無線通信の実験が4月にインテル社によって行われた。これはUWB（Ultra Wideband；超広帯域）と呼ばれる通信方式で、搬送波を使用せずにデジタル信号を直接送信するものである。実験では1mの距離でデータ転送速度173～240Mbpsを得ている。搬送波の処理に必要なアナログ回路が不要となる為、チップセットはデジタル回路だけで構成する事が可能となり、インテル社は全てCMOSデバイスで実現出来るとコメントしている。これが達成されれば、UWBの通信システムはより一層の低電力、低コスト化が可能となる。ブロードバンド・コンテンツの伝送技術として、この様な高速無線通信技術がやがて身近になるものと考えられる。

環境分野

6

①米国エネルギー省によるCO₂地中貯留フィールドテストが行われる

2003年3月20日に米国エネルギー省（DOE）は、ニューメキシコ州で進められているCO₂地中貯留フィールドテストの状況を報告した。これは、ニューメキシコ州の枯渇した油田へCO₂を注入して石油の回収を増進し、温暖化ガスの隔離の可能性を試験するものである。昨年末から2月上旬にかけて約2,100トンのCO₂が注入され、三次元的に地殻を探索する装置を用いて、CO₂の地殻への浸潤挙動が観測されている。

CO₂地中貯留技術は、CO₂を新たなエネルギー源獲得の手段として用いつつ、地球温暖化対策を行うことができる技術である。本フィールドテストでは、封入したCO₂の状況を観測し、注入されたCO₂の長期安全性等の課題解決に向けた研究の進展が期待されている。我が国は、類似のCO₂地中貯留技術の取り組みを開始したところであり、先行する研究機関との積極的な研究交流が重要であろう。

ナノテク・材料分野 7

①米国材料系学会は材料のナノ構造制御やバイオケミカル研究に注目

米国材料系学会のうち、MRS（Materials Research Society）とACerS（American Ceramic Society）の春の講演会が相次いで開催され、ナノ構造制御やバイオケミカル研究が数多く発表された。MRSでは、カーボンナノチューブのデバイス応用セッションが盛況であり、カーボンナノチューブや金属配線を所望の位置に選択的に成長させる研究が増加している。ACerSでは、原材料粉の微細化（nano particle）に関する発表が目立ち、マイクロからナノへのセラミック研究の進展が討議された。両学会とも、学会を挙げて会員の就職斡旋に熱心に取り組んでいる。イラク情勢・SARS等の学会開催への影響は軽微であった。

エネルギー分野 7

①マグネシウム蓄電池のプロトタイプシステムが開発される

イスラエルBar-Ilan大学のAurbach教授らは実用的なマグネシウム蓄電池のプロトタイプシステムの実現に初めて成功した。マグネシウムは資源賦存量、コスト、環境調和性に優れ、蓄電池電極材料としての利用が期待されてきた。本システムの電解質は固体（ゲル）であり、加工性や安全性の観点からも好ましい。また、広い温度範囲で良好な充放電サイクル特性を示し、将来的には電気自動車や電力貯蔵装置などに広く用いられていく可能性がある。

②低温作動固体酸化物形燃料電池で1 kW発電に成功、 世界最高レベルの発電効率が達成される

2003年5月、関西電力㈱と三菱マテリアル㈱は、低温作動（約800℃）の1 kW級発電モジュールで、世界最高レベルの発電効率40％である固体酸化物形燃料電池（SOFC）を開発したと発表した。本モジュールは、約1000℃で動作する従来のSOFCと比較して、低温作動することで、電池の長寿命化や、電池の材料の一部に安価な金属を使用できること等による低コスト化が期待できる。今回の1 kW級低温作動SOFCモジュールの開発は、燃料電池の実用化に向けてさらに近づくものであり、今後の進展が大いに期待されるものと言えよう。

製造技術分野 9

①岩手大学の金型技術研究施設が北上市の寄付によりオープン

岩手大学は岩手県北上市からの寄付で5月1日に工学部附属金型技術研究センターの新技术応用展開部門を開所した。昨年11月の地方財政再建促進特別措置法施行令の改正で国立大学が自治体の寄付で研究施設を設置する初めてのケースである。同センターは金型関連産業の技術高度化や地元企業の技術革新、新商品開発の促進等を行っていく予定で、金型技術だけではなく、新たな産学連携のモデルケースとして地域産業の活性化につながる事が期待される。

特集—1

エピジェネティック・がん研究の必要性

—ポストゲノム時代のがん研究—

— 10

全ヒトゲノム（実際は98.8%）の解読が終了し、本格的なポストゲノム時代が到来した。ポストゲノム研究の国際的なトレンドとして、疾患とゲノムの関係に焦点をあてた研究が進められている。近年、様々な種類のがんや他の多因子疾患の細胞中のゲノムDNA、またはDNAと結合しているヒストンタンパク質に、メチル化やアセチル化などの酵素的な修飾が生じていることが報告されている。そして、このような修飾は遺伝子の転写や発現に影響を与えると考えられ、疾患の発病原因のひとつではないかと推定されている。これは生体内の酵素等によって起こる可逆的な反応であり、食物摂取や環境中の化学物質による被曝等の外的な要因によってその発生率が変動する。

これらの修飾はエピジェネティックと呼ばれ、正常な生体細胞においては生体維持のために必要なメカニズムであり、その異常は疾患（がん等）の原因になると考えられている。

エピジェネティック研究は、DNA上の修飾部位の検出に関する技術の開発により著しく進展し、論文のキーワード検索によると1993年から2002年の10年間でエピジェネティック関連の論文数は7倍にまで増加し、エピジェネティック研究は急速に発展しつつある新興領域であることが示された。

また、欧州では1999年にヒトエピゲノムコンソーシアムが設立され、EU間協力の下にエピジェネティック研究が行われ、米国においてはがん予防に関するエピジェネティック研究プロジェクトが進められている。

このような国際的な情勢から、わが国においてもポストゲノム研究の一つとして、組織的なエピジェネティック研究が必要であると考えられる。

特集—2

RFIDの動向

— 18

さまざまな電子機器のネットワーク接続が進む中で、次のステップとして、物に識別用の小型ICチップを埋め込み、現実世界の物をネットワークにつなげる事が、LSIやネットワーク技術の発展により現実味を帯びて来ている。一方、あらゆる物の動きを全て追跡する事に対する社会的な要求が、流通におけるサプライ・チェーン・マネジメントの効率化やテロ対策などのセキュリティの確保等を目的として、近年急速に高まっている。

この様な背景で、物に埋め込まれたICチップが無線を用いて自動的に電子機器を通してネットワークと情報交換を行なうRFID（Radio Frequency Identification）が、現実の“物”とネットワークとを結ぶ鍵となる技術として、最近注目を浴びている。将来的にこの技術は、ユビキタス・ネットワーク社会の実現に大きく影響を与えていく可能性が高い。RFIDは物流への応用を考えた場合、グローバルな技術となるべきものであろうが、規格標準化に関しては、幾つかの団体の活発な動きが見られ、まだ統一されたものは無い。また実用化は、既存のバーコードを置き換え、サプライ・チェーン・マネジメントの効率化や商品の万引き等による数量減少の防止を目標にまずは、製造・流通業者から進みつつある。

あらゆる物が対象となるこのRFIDは、将来的に社会インフラや個人の生活環境を変える可能性が考えられる。この技術が社会に広く浸透していく為には、産業界のビジネスモデルの検討のみでは不十分であり、セキュリティやプライバシーの問題を含めた運用について、国と社会とで十分に議論していかなければならない。

特集-3

**革新的原子炉としての
高温ガス炉の研究開発動向**

— 27

近年、工学システムの安全・安心、あるいは、水素エネルギーシステムへの関心が国内外で急速に高まっている。このような状況の下、高温ガス炉は、①固有安全性が高いこと、②水素製造をはじめとする核熱の利用が可能であること、③エネルギー市場環境への柔軟な対応が可能な中小型モジュール炉に有望な設計が提案されていることなどから、短中期的な新規導入炉、および、2030年頃の実用化を目途とする第4世代原子力システムとして、国際的に大きな注目を集めている。

わが国では、90年代から日本原子力研究所が高温工学試験研究炉（HTTR）による核熱利用研究を進めており、その水準は世界トップクラスである。各国が高温ガス炉を次世代型原子炉の有力オプションとして位置付け、本格的な研究開発に取り組みつつある中、わが国としても高温ガス炉の多様な可能性に着目した研究開発を推進していくことが重要である。また、HTTRに続く原型炉、および、小型高効率発電試験炉などの建設についても官民で検討していく必要がある。

特に、高温ガス炉を熱源としたCO₂フリーで大規模な水素製造は、発電のみに限定されてきた原子力エネルギーの用途を拡大し、エネルギーシステム全体におけるその役割を大きく変える可能性がある。DOEの2004年度予算要求ではHydrogenFuelイニシアチブの一環としてNuclear Hydrogenプロジェクトが新規提案された。わが国においても、高温ガス炉をはじめとする原子炉による水素製造に関する研究開発プロジェクトの発足が望まれよう。

科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（5月号は2003年4月5日より2003年5月9日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

ライフサイエンス分野

①低温（クライオ）電子顕微鏡法による、細胞内小器官の3次元立体構造の観察

細胞内における膜構造や細胞骨格などの構造を直接観察する手段として、電子顕微鏡は大きな役割を果たしてきた。しかし、水を主成分とする生物材料を真空中にさらし、電子線を用いて結像させることが必要なため、観察可能な試料を作るには、材料の化学固定・樹脂包埋・切片作成そして染色という一連のプロセスを経る必要がある。立体的な分子構築を探るためには、連続切片を作りそれらを積層して3次元再構成を行うが、最近、これに代わる電子顕微鏡トモグラフィが大きく注目されている。この技術は、原理的には人体の断面を見ることができるX線CTと同様で、電子顕微鏡内で試料を傾斜してあらゆる方向から像を撮影し、それらの像を全て足し合わせて元の3次元像を復元するという方法（逆投影法）である。実は、試料傾斜角度の制約によるゴースト像の発生などまだ克服すべき問題も多いが、各種の急速凍結技術、画像処理ソフトウェアそしてハードウェアの改良などにより、かなり実用的な方法となっ

きた。

マックスプランク研究所の研究チームはこのほど、生きた細胞を急速凍結し、一切の前処理なしに低温（クライオ）電子顕微鏡に挿入してその内部構造をトモグラフィで可視化するという画期的な技術を開発した。それにより、細胞内でのアクチン・フィラメントの走行や小胞体膜に結合したリボゾーム、そしてプロテアゾームなどの小器官の姿をin situの状態で見えることに成功した（Science Vol.298, pp.1209 - 1213, 2002）。空間分解能はまだ数nmであり、個々の蛋白質の分子内構造を識別できるまでには至らないが、光学顕微鏡と電子顕微鏡を巧みに使い分ければ、細胞生物学者にとってこれまで夢であった細胞内蛋白質ダイナミクスの直接観察も十分に実現可能な射程に入ってきたようである。20世紀の終盤は「光学顕微鏡のルネッサンス」であったが、21世紀前半には「電子顕微鏡のルネッサンス」が訪れるであろう。（東京大学医科学研究所 片山 栄 作氏）

②全米科学アカデミーが極地生物のゲノム解析プロジェクトを計画

全米科学アカデミー（U.S.

National Academy of Science）は2003年2月7日に極地生物のゲノム解析計画に関するレポートを発表した（Nature Vol.421, p.880, 2003）。

この計画は、極地の生物が環境とどのように影響しあっているかをゲノムレベルで解析しようとするものであり、この研究により進化的な適応のメカニズムが解明され、潜在的に有用な遺伝子が見出されるなどの成果が得られると期待されている。例えば、ここで得られた低温適応生物の遺伝子が植物に導入され、寒冷地栽培が可能となったり、また、極地の海老に似た生物のクリル（krill）の生産する蛋白質が食品の保存に利用されたりするかもしれない。この計画をスムーズに推進するために、研究者が極地へ行かなくても初期の研究の遂行が可能な“Freezer farm”を米国内に設置することが考えられている。

日本においても、極限環境微生物、深海生物等の研究が活発に行なわれているが、南極、北極等の生物のゲノム研究については、ほとんど行なわれていないと思われる。極地生物のゲノム解析は興味ある研究である。

（味の素㈱ 都河 龍一郎氏）

情報通信分野

①超広帯域（UWB）無線による通信の実験が行なわれる

無線LANへの応用を目的とした近距離無線通信は、マイクロ波帯（2.4または5 GHz）を用いた規格の実用化が進んでいる。通信速度に関しても、97年に公開された最初の規格であるIEEE802.11^{（注1）}の2 Mbpsに始まり、現在策定中の拡張仕様IEEE802.11gでは54Mbpsと6年程で30倍近くも向上する事になる。これはデジタル信号送信の多重化技術（直交周波数分割多重；OFDM）を組み合わせて、達成されたものである。また、さらにより周波数の高いミリ波を用いる通信や複数のアンテナを使用して伝送路を多重化する技術等により、光ファイバー（FTTH）やFast Ethernet（100BASE Ethernet）等の有線と同等の100Mbpsを超える超高速の無線通信も実用に近い技術となって来ている。

（注1）ネットワーク関連の規格を作成するIEEE（米国電気電子学会）802標準化委員会の11番目の作業分科会

ところがこれら搬送波の高周波数化や多重化とは全く異なる手法での高速無線通信の実験が、日本では初めて、この4月にインテル社によって行われた。これはUWB（Ultra Wideband；超広帯域）と呼ばれる通信方式で、搬送波を使用せずにデジタル信号を直接送信するものであり、米国で盛んに研究されている。帯域は7.5（3.0～10.5）GHzにも及ぶ事になるが、帯域あたりの平均電力は低く、通信距離が10m以下の場合、送信電力は熱雑音レベル以下となる。今回、インテル社はUWB使用帯域を複数に分割するマルチバンドと呼ばれる方式で実験を行った。実際には、3.1～6.1の3 GHzの帯域を500MHz毎に6チャンネルに分割して1 mの距離でデータ転送を

行い、合計データ転送速度173～240Mbps（理論値252Mbps）を得ている。なお、今回の無線局の実験免許は総務省への申請から約2ヶ月後の交付との事である。UWBは搬送波を用いない為、チップセットはデジタル回路だけで構成する事が可能となる。送信電力が低い事もあり、インテル社はUWBのチップセットは全てCMOSデバイスで実現出来るとコメントしている。これが達成されれば、UWBの通信システムはより一層の低電力、低コスト化が可能となる。また、独立行政法人通信総合研究所でも、平成14年度から、マイクロ波帯からミリ波帯を用いたUWB無線システムの研究開発を開始しており、IEEE（米国電気電子技術者協会）へ標準化案を提案するなど、実用化・標準化に向け精力的な取り組みを進めている。ブロードバンド・コンテンツを最終的にパーソナルエリアに届ける伝送技術として、このような高速無線通信技術がやがて身近になるものと考えられる。

環境分野

①米国エネルギー省によるCO₂地中貯留フィールドテストが行われる

2003年3月20日に米国エネルギー省（DOE）は、ニューメキシコ州で進められているCO₂地中貯留フィールドテストの状況を報告した。これは、DOEが、Vision21 Program Plan（1999年公表）の中で、21世紀のエネルギープラントが必要とする5つのキーテクノロジーの1つとして掲げた技術であ

り、排出されたCO₂を削減する、CO₂分離回収・貯留・固定化技術に関する研究プロジェクトである。このCO₂地中貯留フィールドテストでは、2002年12月20日から2003年2月10日の期間、ニューメキシコ州のHobbs近くの枯渇した油田へ約2100トンのCO₂が注入された。この量は平均的な規模の石炭火力発電所から排出される一日の排出量に相当する。現在、三次元的に地殻を探索する装置を用いて、CO₂の地殻への浸潤挙動を観測している。

CO₂地中貯留技術は、CO₂を新たなエネルギー源獲得の手段として用いつつ、地球温暖化対策を行うことができる技術であり、CO₂の有効利用、経済性の観点からも、かかる期待が大きい。ただ、現在のところ、CO₂地中貯留技術は、注入されたCO₂の長期安全性、地下深部におけるCO₂の長期挙動予測などの課題がある。本フィールドテストでは、封入したCO₂の状況を観測し、地殻のCO₂の保持機能や物理・化学反応に関するデータを取得すると共に、様々なモデ

ルやシミュレーションツールの精度を確認するとしている。

我が国では、京都議定書の批准を受け、排出されたCO₂を削減する技術の必要性が一層高まっている。昨年度からCO₂地中貯留技術

の研究開発として、国内におけるCO₂削減ポテンシャルと導入可能性の双方が高い炭層への貯留技術について研究を開始している。本フィールドテストは、関連する我が国の研究にも大いに参考になる

と考えられる。今後、こうした先行する海外の研究機関と積極的な研究交流を図り、効果的な研究開発を推進することが重要であろう。

ナノテク・材料分野

①米国材料系学会は材料のナノ構造制御やバイオケミカル研究に注目

米国材料系学会のうち、MRS (Materials Research Society) Spring Meeting (4/21 - 25, San Francisco) とACerS (American Ceramic Society) 105th Annual Meeting (4/27 - 30, Nashville) が相次いで開催され、ナノ構造制御やバイオケミカル研究が数多く発表された。

MRSは境界領域の研究を狙った比較的歴史の新しい学会で、現在も会員数は増加中である。春は秋の講演会に比べて小規模だが、それでも今回の参加登録者は2600人以上、発表件数約2100、イラク情勢・SARS等の影響は軽微とのことである。MRSは各シンポジウム（セッション）の内容を明記して論文募集する形をとり、春はエレクトロニクス応用系材料の論文が募集された。今回構成は、

Electronic and Optical Materials、Molecular Materials and Biomaterials、Nanostructured Materials、Generalの4分野、全26シンポジウムであった。ナノテクノロジーは大きく取り上げられているが内容はまだ混沌としている状態である。カーボンナノチューブのデバイス応用セッションが盛況であり、所望の位置に選択的にカーボンナノチューブや金属配線を成長させる研究が増加している。一方、バイオケミカル研究は、BioMEMSも含めて発表増加が目立った。特筆すべき学会活動としては、学会開催中の就職斡旋活動、政府系各財団ディレクタークラスからの方針説明講演、弁理士による特許申請の具体的解説、インターネット駆使による会員へのサービス提供、などがあり、これらは日本の材料系学会の今後の活動の参考になるであろう。

一方、ACerSは、設立後100年以上経ったセラミックス材料専門

の由緒ある世界的な学会で、今回の参加登録者は約1800人で33のセッションから成った。特に、新規学生会員の募集と啓蒙に力を入れている。この学会では、マイクロサイズ（ μm ）とナノサイズ（nm）の技術的違いを強く意識している。例えばナノテクノロジー技術としては原材料粉の微細化（nano particle）に関する発表が目立ったが、これらは多孔質材料や触媒担体などでは威力を発揮するが、高密度焼結体の原料としては相応しくないこともきちんと認識されている。「ナノ材料の産業化」に関するパネルディスカッションでは、産業化に相応しいのは真にナノオーダーを追及することに意味のある研究結果だけであると述べられていた。また、この学会でも開催中の就職斡旋活動は盛んであり、マネージメント研修のコースも設けられていた。

エネルギー分野

①マグネシウム蓄電池のプロトタイプシステムが開発される

地球規模のエネルギー・環境問題の克服に向け、ほぼ全エネルギーを石油に依存している運輸部門のグリーン化は最も重要な課題の一つである。電気自動車はクリー

ン自動車の一つとして期待されているが、その性能は蓄電池に大きく左右される。これまで、電気自動車用の蓄電池としては、鉛蓄電池、ニッケル・カドミウム蓄電池、ニッケル・水素蓄電池、リチウムイオン蓄電池などが開発されているが、いずれも、エネルギー密度、コスト、毒性などの面で課題があった。

この度、イスラエル Bar-Ilan 大学の Aurbach 教授らは実用的なマグネシウム蓄電池のプロトタイプシステムの実現に世界で初めて成功した（Advanced Materials 2003 年4月17日号）^{（注1）}。

（注1）本研究成果については、Nature Science Update 2003年4月22日でも取り上げられている

(<http://www.nature.com/nsu/030414/030414-14.html>)

マグネシウムは豊富に存在し、安価である上、軽く、無害である。このため、近年、マグネシウムを負極に用いる蓄電池の研究開発が、活発に進められてきた。しかし、マグネシウムは脆く加工性に乏しい上、マグネシウムの負極に対して、充電と放電を繰り返すことができる電解質材料および正極材料の開発が課題となっていた。同グループは様々な候補材料の性能評価試験を行い、負極（アノード）材料にマグネシウム合金（3%Al, 1%Zn）、正極（カソード）材料に Mo_6S_8 、電解質にゲル状物質であるPVdF/Mg(AlCl_2EtBu)₂/tetraglyme^(注2)の組み合わせを選択した。本システムは0～80℃の範囲で良好な充放電サイクル特性を示し、放電容量は作動温度60℃で約100mAh/gに達した（放電電圧は0.9～1.2V）^(注3)。また、電解質が固体であり、加工性や安全性の観点からも好ましい。同グループではエネルギー密度をさらに向上させるため、新しい正極材料の開発を進めている。

マグネシウム蓄電池はコスト、環境調和性に優れ、将来的には、既存の蓄電池にかわり、電気自動車や電力貯蔵装置に広く用いられていく可能性がある。本研究は、マグネシウム蓄電池の研究開発に

おいて重要な成果であり、今後、クリーン自動車研究開発戦略における電気自動車の位置付けへの影響が注目される。

（注2）PVdF：polyvinylidene difluoride tetraglyme： $\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_4\text{CH}_3$

（注3）これらの値から、エネルギー密度も現在最も高いリチウムイオン電池（約100mWh/g）に匹敵すると計算される。

②低温作動固体酸化物燃料電池で1kW発電に成功、世界最高レベルの発電効率が達成される

環境性や省エネ性の高さから、我が国は官民を挙げて燃料電池の研究開発を進めている。その中でも、固体酸化物燃料電池（SOFC）は、他の燃料電池と比べ発電効率が高く、作動温度が高温（約1000℃）であることから内部改質^①でき、排ガスによる複合発電で総合効率を高めることができる特徴がある。この他SOFCは、固体高分子形燃料電池などでは白金被毒のために使えない一酸化炭素が、高温作動のため利用できるなど、多様な燃料を使用できる点に優れている。こうしたことから、将来は、家庭用小型電源から火力発電所の代替用までの幅広い利用が期待さ

れている。

しかしながら、SOFCは、作動温度が高温であることから、熱による劣化が生じやすいため寿命が短いことや、構成材料が制約されることから高コストとなるといった課題がある。そこで近年は、SOFCを低温作動させることでこうした課題の解決を目指した研究が進められている。

2003年5月、関西電力㈱と三菱マテリアル㈱は、従来の発電効率である35%程度^②を大きく上回る発電効率40%を達成する低温（約800℃）作動の1kW級SOFC発電モジュール^③開発したと発表した。この低温作動SOFCは、新たな電解質や電極の開発により、従来の高温作動並みの出力密度を実現するもので、起動時間の短縮等の操作性向上や、電池の長寿命化に加え、電池の材料の一部に安価なステンレス等の金属を使用することによる低コスト化が期待できる。

この低温作動SOFCは、今後、モジュールの次の段階である1kW級システムの開発、さらに中型店舗や小工場等向けとなる数十kW級システムの開発が進められる予定である。今回の1kW級発電モジュールの開発は、燃料電池の実用化に向けてさらに近づくものであり、今後の進展が大いに期待されるものと言えよう。

用語説明

- ①電池内部で燃料（メタン等）から水素への改質反応が起こること。これにより改質器が不要となる。
- ②Sulzer Hexis社（スイス）、Global Thermoelectric社（カナダ）のSOFCシステムをモジュール値に換算。
- ③発電システムを構成する基本構造体。

製造技術分野

① 岩手大学の金型技術研究施設が北上市の寄付によりオープン

岩手大学は岩手県北上市からの寄付で金型技術研究施設を開設した。5月1日に開所したのは岩手大学工学部付属金型技術研究センターの新技术応用展開部門。昨年11月の地方財政再建促進特別措置法施行令の改正で市町村から国立大学への寄付が可能となり、国立大学が自治体の寄付で研究施設を設置する初めてのケースである。設置期間は当面5年間で、金型関連産業の技術高度化や地元企業の技術革新、新商品開発の促進、技術者の再教育等を行っていく。

付属金型技術研究センターは今年2月に工学部内に設置された。金型の設計や解析、加工、表面処理、評価などを研究する「基礎研

究部門」は学部内に置かれ、基礎研究の成果を製品開発に生かす「新技术応用展開部門」を岩手県や北上市などが運営する第三セクターの産業業務支援施設「北上オフィスプラザ」内のサテライトオフィスに開設した。

岩手大学は2001年10月に北上市と学術、教育、文化分野で援助、協力する相互友好協力協定を締結しており、今回の新技术応用展開部門設置につながった。同大学は、他の県内3市とも同様の協定を結んでいる。同大学の共同研究数は全国的にも上位であるが、その相手先は県内の中小企業が過半数を占めており、地域に根ざした産学連携を進めて来ている。

北上市内には、信号機のレンズ用の特殊金型や、高級時計の針を製造する精密金型等、精密機器部品の製造に不可欠な金型製造工場が34社あるが、生産コストの低

い中国などに工場の機能を部分的に移転する企業もある。市は産学連携によって付加価値の高い金型製造技術を提供する環境を整えることで、企業誘致や地域企業の技術レベルの底上げにつなげたいと考えてである。

同センターでは、高度な金型技術を必要とする微小なプラスチック製部品や微細精密プレス製品などの生産技術への応用展開を検討しており、小型IT機器や医療用マイクロマシンなどの部品をターゲットにしている。同センターが金型技術だけではなく、新たな産学連携のモデルケースとして大学と地域の窓口として活用され、地域産業の活性化につながる事が期待される。岩手大学では開所を機に6月24日に北上市で講演会とシンポジウムの開催を予定している。

.....

特集①

エピジェネティック・がん研究の必要性 —ポストゲノム時代のがん研究—

ライフサイエンス・医療ユニット 伊藤 裕子



1. はじめに

全ヒトゲノム（実際は98.8%）が解読されたとして、2003年4月14日にヒトゲノムプロジェクトの終了が宣言された。これは同時に、本格的なポストゲノム時代の到来を意味した。

実際には、約5年前から世界各国においてポストゲノム時代を見据えた研究内容や研究体制への移行がみられている。日本においてもポストゲノム研究として、ゲノム情報に基づくタンパク質の構造・機能解析、糖鎖の構造・機能解析、疾患に関連したSNPs解析等の研究の推進が図られている。

ポストゲノム研究の国際的なト

レンドとして、疾患とゲノムの関係に焦点をあてた研究が進められている。近年、様々な種類のがんや他の多因子疾患の細胞中のゲノムDNAまたはDNAと結合しているヒストンに、メチル化やアセチル化などの酵素的な修飾が生じていることが観察されている。このような修飾は遺伝子の転写や発現に影響を与えると考えられ、これが疾患の発病原因のひとつではないかと推定されている¹⁾。これは生体内の酵素等によって起こる可逆的な反応であり、食物摂取や環境中の化学物質による被曝等の外的な要因によって、その発生率が

変動することが報告されている。

これらの修飾はエピジェネティックと呼ばれ、正常な生体細胞においては生体維持のために必要なメカニズムでもあり、その異常は疾患（がん等）の原因になると考えられる。

本稿では、がん研究分野の注目研究領域として「エピジェネティック (epigenetic)」について取り上げ、その解説およびがんとの関連性、さらにエピジェネティック・がん研究の国際的な動向について概説する。

2. エピジェネティックとは何か？

エピジェネティック (epigenetic) の語源は、17～18世紀の生物学の中心思想である個体発生の前成説 (preformation) に対する後成説 (エピジェネシス epigenesis) からきている。前成説によると生物は最初から潜在的に存在した性質が展開されて個体になるとされ、後成説によると生物は発生の過程で順次、内的小および外的な影響を受けて個体になるとされた。現在では「エピジェネティック」は、ゲノム自身の変異以外のメカニズムで遺伝子の発現に影響を与える現象を指している。エピジェネティック研究により遺伝子発現の制御メカニズムが解明されるこ

とは、遺伝子発現に関わる様々な分野の研究の進展を促進することが予測される (図表1)。

2 - 1

正常な生体における エピジェネティック

エピジェネティックは正常な生体維持に関して重要な働きをしている。例えば、一人の人間の皮膚、心臓、または肝臓の細胞からDNAを抽出してゲノムを解読すると、これらのゲノムは基本的に同じであることが示される。しかし、それぞれの遺伝子の発現パターンを調べると異なっている。皮

膚は皮膚に必要な遺伝子のみ発現され、心臓は心臓に必要な遺伝子が発現され、肝臓は肝臓に必要な遺伝子が発現されている。このような遺伝子の発現制御はエピジェネティックによってなされ、発生によりゲノムが決定した後の細胞分化の過程で生じる。つまり、生体内の全ての細胞がエピジェネティックによる遺伝子発現の制御を受けている (生殖細胞を除く)。

それ以外の正常な生体におけるエピジェネティックによる遺伝子発現制御には、X染色体不活化および遺伝的刷り込みという現象がある²⁾。

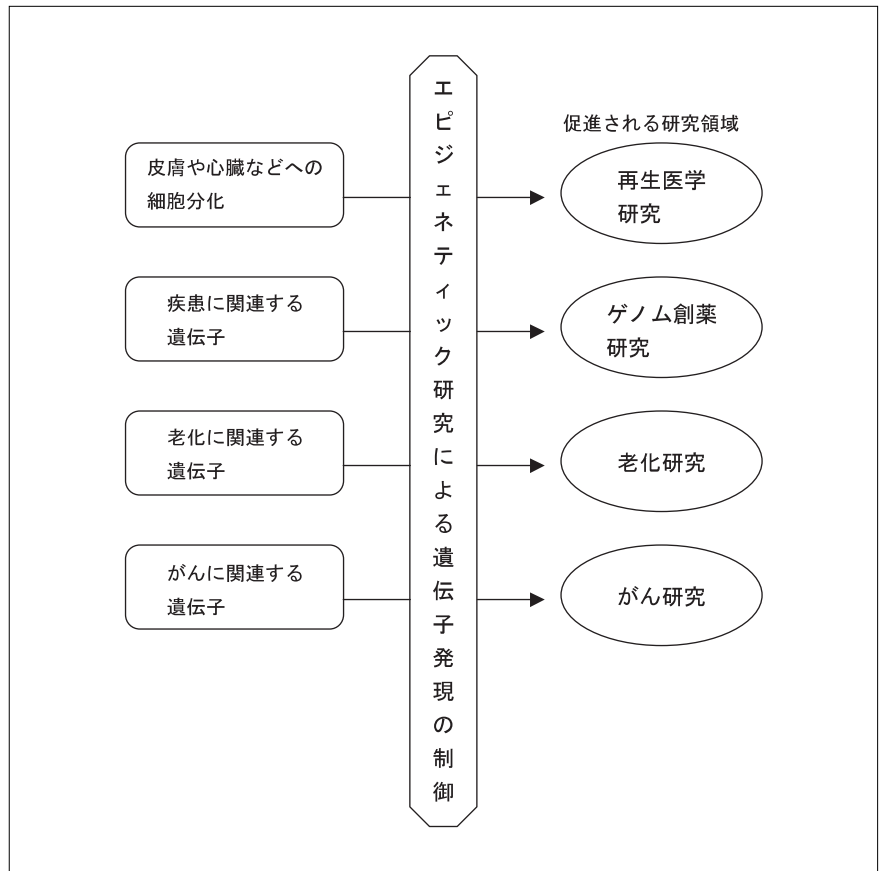
X染色体の不活性化とは、女性

は父方と母方からそれぞれ1本ずつ計2本のX染色体を持つが、どちらかのX染色体は不活性であるという現象である。つまり女性の細胞は通常、「父方のX染色体が不活性化された細胞」と「母方のX染色体が不活性化された細胞」がランダムに混じったモザイクである。不活性化は胚発生初期に起こり、細胞が分裂すると娘細胞には同じ不活性化状態が伝わる。女性の細胞に起きるX染色体の不活性化は、男性のX染色体は1個であるので、男女の遺伝子量のアンバランスを解消するためであると考えられている。

ヒトは1個の正常な細胞中に23本の染色体を1対、つまり計46本の染色体を持ち、23本の染色体はそれぞれ父方と母方から由来している。染色体はDNAとヒストンなどが結合した複合体（クロマチン）から構成されており、従って1個の細胞中には父方由来と母方由来の同じ遺伝子が2個存在することになる。遺伝的刷り込み（インプリンティング）とは、父方と母方由来の遺伝子で発現状態が異なるものが存在する現象である。発現が抑制されている方の遺伝子をインプリンティングであるという。

上記のいずれの現象も発生・分化の早い段階で生じると報告されているが、詳しいメカニズムや生体に対する明確な意義はまだわかっていない。

図表1 エピジェネティック研究により進展すると考えられる研究領域



科学技術動向研究センターにて作成

2 - 2

エピジェネティックによる遺伝子の発現制御のメカニズム

エピジェネティックによる遺伝子の発現制御のメカニズムとして、DNAメチル化、ヒストンのアセチル化とメチル化、およびクロマチンリモデリングなどがある（図表2）。

これらは酵素による修飾である

図表2 エピジェネティックによる遺伝子発現の制御メカニズム

制御メカニズム名	制御メカニズムの内容
DNAメチル化	ゲノムDNA中のCpG配列中のシトシンをメチル化して、遺伝子の転写や発現に関わる因子や酵素等の接近を阻害する。
ヒストンのアセチル化とメチル化	ヒストンをアセチル化またはメチル化することにより、DNAとヒストンの複合体であるクロマチン構造の変化を変化させて、遺伝子の転写や発現に影響を与える。
クロマチンリモデリング	クロマチン構造を凝縮させることにより転写や発現に関わる因子や酵素等の接近を阻害し、クロマチン構造の緩和によりこれらの接近を促進する。

科学技術動向研究センターにて作成

ので、化学的な処理によっては修飾が失われることおよび検出そのものが出来ないことがあるなど、検出感度において満足が行く技術が無かった。また少量な生体試料からの検出は困難だったため、エピジェネティックと疾患の関連性の研究はあまりなされていなかった。しかし、1992年に亜硫酸水素塩シーケンス法が開発され、少量のDNA試料からのDNAメチル化パターンの検出が可能になった。さらに2000年に開発されたマイクロアレイを用いたDMH（differential methylation hybridization）法や、2001年に報告された蛍光色素を用いたリアルタイムPCR法であるMethyLight法により、DNAメチル化の検出の感度と速度は大幅に向上した^{3, 4)}。

これらの検出技術の向上によってDNAメチル化とがんなどの疾患に関する研究が可能となり、現在DNAメチル化はがん研究にお

いて注目されている。従って、以降はDNAメチル化を中心に取り上げる。

2-3

DNAメチル化による遺伝子発現の制御メカニズム

DNAメチル化とは、DNAメチルトランスフェラーゼという酵素によりDNA中のシトシン塩基の5位にメチル基が付加されて5-メチルシトシンができることをいう。5位メチル化は塩基対形成には影響しないので、5-メチルシトシンはグアニン塩基と塩基対を形成できる。従って、DNAの複製は正常に生じる。しかし5-メチルシトシンは、遺伝子の発現を構造的に妨害する。

通常、遺伝子が発現するためには、遺伝子のプロモーター領域（遺伝子の転写に係るDNA配列）に遺伝子調節タンパクおよび転写因子が結合することが必要である。つまり、遺伝子発現がオンの状態というのは、プロモーター領域に遺伝子調節タンパクおよび

転写因子が結合しており、DNAメチルトランスフェラーゼはプロモーター領域のDNAに物理的に接近できず、メチル化がされていない状態である。

そして結合していた転写因子等の大部分が遊離するとDNAメチルトランスフェラーゼはDNAに接近可能になり、プロモーター領域のDNAはメチル化を受け易くなる。一度メチル化を受けると、生体内にはメチル化されたDNAに特異的に結合するタンパクが存在するので、このタンパクの結合により脱メチル化が妨げられてメチル化の状態が維持され、遺伝子の発現は安定的に阻止される。

さらに、親DNA鎖で起きたメチル化パターンは維持型メチラーゼ（maintenance methylase）により、容易に娘DNA鎖に受け継がれる。つまり、ある細胞のゲノム中でDNAメチル化が生じると、その細胞を親細胞として分裂した全ての娘細胞が同じ場所にメチル化したDNAを持つことになる。

これは細胞分化の過程において特に重要なメカニズムであり、分

化後の皮膚細胞が心臓の細胞や肝細胞に簡単に変化することを防いでいる。

2-4

正常な生体のDNAメチル化と疾患に関連するDNAメチル化

DNAメチル化が、生体を正常に保つために不必要な遺伝子発現を抑制するということは既に述べた。従って疾患に関連するDNAメチル化とは、①正常な場所に生じるDNAメチル化が何らかの原因で正常ではない場所に生じ、これにより生体に必要な遺伝子の発現が抑制されること、あるいは②正常な状態では安定的にメチル化されている場所であるのに、何らかの原因でそのメチル化が外れ、正常な生体では抑制されるべきである不必要な遺伝子の発現が促進されることであると考えられる。

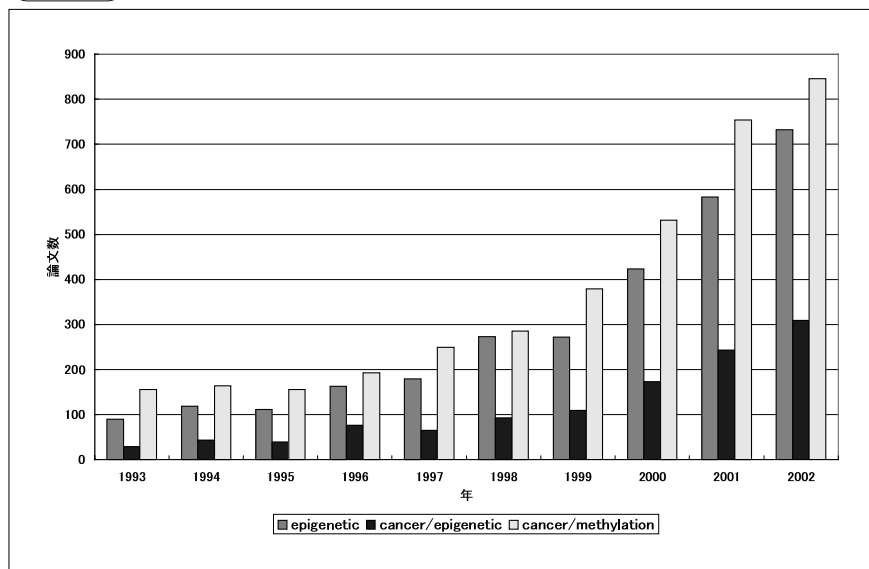
がんDNAメチル化に関しては第4章で述べる。

3. エピジェネティック関連の論文数の推移

エピジェネティック研究の動向を分析するために、医学関係論文データベースであるPubMedのキーワードによる論文検索機能を用いて、エピジェネティック関係の論文数の推移（1993年から2002年まで）を調べた（図表3）。

「エピジェネティック（epigenetic）」で検索すると、1996年および1998年の論文数の増加は前年度に比較すると顕著であるが、2000年以降に急激に論文数が増加していることが示された。「エピジェネティック（epigenetic）」と「がん（cancer）」でも、同様に2000年度以降に顕著な論文数の増加が示され、「メチル化（methylation）」と「がん（cancer）」で

図表3 エピジェネティック関連の文献の推移（1993～2002年）



科学技術動向研究センターにて作成

も同じ傾向がみられた。

エピジェネティックは老化やがん以外の疾病にも関与していることが近年報告されており、2000年以降の急激な論文数の増加はこれを反映していると推測される。また、ヒトゲノム解析終了が間近に

なり（2000年当時）、ポストゲノムとしてのエピジェネティック研究に目を向けられ始めてきたこと、および前述したDNAメチル化の検出技術の向上がエピジェネティック研究を進展させたことが、2000年以降の急増に繋がった

と考えられる。

以上の論文数の推移から、エピジェネティック研究およびエピジェネティック・がん研究は、急速に発展しつつある新興領域であると考えられる。

4. がんとエピジェネティック

分子生物学の研究の進展により、がんはゲノムや遺伝子の異常で発症するという認識は広く定着した。近年、エピジェネティック研究が国際的に注目を集めているのは、エピジェネティック（の異常）が原因でがんが発症することがわかって来たからである⁵⁾。

4 - 1

がんとは何か？

がんは「①正常な抑制を無視して増殖し、②通常は他の細胞の領地である所に進入し、そこを占領する（細胞の分子生物学第3版より）」と定義され、定義の①の特徴を持つが腫瘍細胞が一箇所で留まっている場合は良性と言われる。通常、良性の場合は外科的に腫瘍を取り除くことで完治する。がんと呼ばれる悪性の状態は、周囲の組織への浸潤や他の臓器への転移を起こすので治療を困難にしている。

近年の分子生物学の発展により、定義の①および②を細胞に生じさせる原因は「がん遺伝子」や「がん抑制遺伝子」などのがん関連遺伝子上の変化（異常）であるという認識が定着した。そしてこれらの遺伝子の変化には、大きく分けて「質的な変化」と「量的な変化」があることが分かってきた。

4 - 2

遺伝子の「質的な変化」と「量的な変化」による発がん

DNA配列中に生じる「質的な変化」による発がんは、最も注目されてきた。なぜなら、がん細胞のゲノムDNA中に多くの遺伝子変異が検出され、これらの遺伝子変異が発がんやがんの悪性化に関連していると考えられてきたからである。

がん細胞中の遺伝子発現レベルの「量的な変化」による発がんとは、がん抑制遺伝子やDNA修復

遺伝子等の転写活性の低下または阻害により遺伝子およびタンパクの量が減少し、正常な細胞周期の維持が出来なくなりがん化を起こすことである。また、がん遺伝子の転写活性レベルが増大することによりがん遺伝子およびタンパクの量が増加し、やはり細胞周期の制御が不可能になりがん化を起こすこともある。その原因はゲノムDNA自体の変異だけでなく、エピジェネティック（の異常）も関与していると考えられている。

4 - 3

がん細胞中のDNAメチル化

がん細胞のゲノムDNA中には多くのDNAメチル化が観察され、近年、メチル化と発がんに関連性があることがわかってきている。

図表4にがんの種類とメチル化が観察された遺伝子を示した。メチル化されて遺伝子発現が抑制された遺伝子はがん抑制遺伝子だけでなく、細胞機能の様々な段階に関与する遺伝子が含まれることが示された⁶⁾。また、多くのがんに共通に観察されるメチル化以外に、数種のがんにのみ特異的にメチル化される遺伝子が存在することから、がんの種類によって異なるがん化のメカニズムが存在することが推測される。

それぞれのがんの治療研究に対する基礎的な研究情報として、データベースを利用したメチル化遺伝子の情報の集約は必要であると考えられる。

図表4 がん細胞中に観察されたメチル化を受けた遺伝子の例（一部）

遺伝子	遺伝子の役割	がんの種類
p14 (ARF)	細胞周期	大腸がん、胃がん
p16 (INK4a)	細胞周期	リンパ腫、すい臓がん、大腸がん、胃がん
hMLH1	DNA修復	大腸がん、子宮がん
BRCA1	DNA修復、がん抑制	卵巣がん、乳がん
MGMT	DNA修復	大腸がん、脳腫瘍
GSTP1	無毒化	肝臓がん
DAPK	アポトーシス	リンパ腫
CDH1	細胞接着	食道がん
TIMP3	タンパク分解阻害	腎臓がん
APC	がん抑制	胃がん、すい臓がん、肝臓がん

参考文献⁶⁾を参照し科学技術動向研究センターにて作成

4 - 4

がん細胞中のDNAメチル化のパターン

がん細胞中に観察されるメチル化のパターンには¹⁾、広範囲のメチル化の低下 (hypomethylation) または脱メチル化 (demethylation)、および²⁾ 部位特異的 (遺伝子のプロモーター領域等) な高メチル化 (hypermethylation) がある^{7, 8)}。

低メチル化および脱メチル化が生じると、それぞれの細胞において不必要な遺伝子 (例えば皮膚細胞の遺伝子発現に、肝臓細胞で発現している全ての遺伝子は必要ではない) の発現が抑制されないの で染色体の不安定性を招き、遺伝子変異のリスクを高めると報告されている。多くの場合、低メチル化は広範囲に観察される。

部位特異的な高メチル化とは、遺伝子のプロモーター領域など遺伝子発現に関係する領域に集中的にメチル化が観察される現象であり、がん化を抑制する働きをもつがん抑制遺伝子やDNA修復遺伝子の発現を妨げる。

図表5に、正常細胞とがん細胞のゲノムDNA中に観察されるDNAメチル化の違いを示した。

図表5 正常細胞とがん細胞のゲノムDNA中に観察されるDNAメチル化

ゲノムDNA配列の例	正常細胞	がん細胞
CTGなど同じパターンを繰り返しているDNA配列	メチル化	脱メチル化 (低メチル化)
ウイルスなどの外来性のDNA配列	メチル化	脱メチル化 (低メチル化)
がん抑制遺伝子のプロモーターDNA配列	脱メチル化 (低メチル化)	メチル化

科学技術動向研究センターにて作成

4 - 5

DNAメチル化に影響を与える物質

近年の研究により、食品中に含まれる物質の欠乏あるいは過剰摂取によって、正常細胞のメチル化の状態が影響を受けることが示された。

図表6にDNAメチル化に影響を与えることが報告されている物質を示した。詳細なメカニズムは明らかではないが、メチル基を供与できる化学構造を持つ物質は欠乏により細胞内のDNAに低メチル化 (染色体不安定性) を引き起こすことが推測される^{9~12)}。

また環境汚染物質であるヒ素は、動物実験では低メチル食 (コリンや葉酸を含まない) と共に摂取されると、DNAの低メチル化をさらに促進することが報告されており、安全基準の設定などの議論や調査・研究が必要だと考えら

れる。

4 - 6

化学物質の欠乏による発がん と補充によるがん予防

メチル基を供給できる化学物質の欠乏と発がんとの関係については、1980年代半ばから研究がなされるようになった。論文において、コリンなどを含まない食餌を1年から1年半与えた実験動物 (ラット) の肝臓にがんや腫瘍が高頻度に生じ、それらの細胞のDNAメチル化パターンは正常と異なる (低メチル化) ことが既に報告されていた。しかし、繰り返しになるが、当時はDNAメチル化の検出の技術が十分ではなかったため、それ以上の詳細な研究は行われなかった。

現在では、化学物質の欠乏と発がんのリスク上昇は確かに相関性があると考えられており、次第に化学物質の補充による発がん予防

図表6 メチル化に影響を与えると報告されている物質

物質名等	含まれる食品等	摂取量	メチル化の状態	遺伝子の状態
メチオニン	動物性タンパク質	欠乏	低メチル化	不安定
コリン	卵黄	欠乏	低メチル化	不安定
葉酸	緑黄色野菜	欠乏	低メチル化	不安定
葉酸	緑黄色野菜	欠乏	メチル化	がん抑制遺伝子p53の抑制
ビタミンB ₁₂	卵、魚貝類	欠乏	低メチル化	不安定
亜鉛	貝類	欠乏	低メチル化	不安定
セレンウム	キノコ、昆布	欠乏	低メチル化	不安定
レチノイン酸	鰻、レバー、卵黄	過剰	低メチル化	不安定
アルコール	酒	過剰	低メチル化	不安定
ヒ素	環境汚染 (飲料水)	過剰?	低メチル化	不安定

NCIのHPおよび参考文献^{9~12)}を参照し科学技術動向研究センターにて作成

の可能性に関する研究に焦点が移ってきている。

2000年には、大腸がんを発症しやすく遺伝子改変した実験動物（マウス）を用いて、食餌中の葉酸の有無に関する影響（1～2ヶ月間給餌）が調べられた¹³⁾。葉酸入り

の食餌を与えたグループでは、葉酸なしの食餌を与えられたグループと比較して、正常なメチル化の状態を示した。そして、腫瘍が腸内にできる前から継続的に葉酸入りの食餌を与えられたグループでは、葉酸なしのグループと比較し

て腺腫（ポリープ）の発症率が減少した。しかし、腫瘍が形成されてからの葉酸入りの食餌には効果がなく、がん予防としての葉酸の補充はタイミングを図る必要があることが示された。

5. エピジェネティック・がん研究の国際的な動向

環境中の化学物質による暴露や食事および生活習慣などの外的な要因によって、発がんの危険率は影響を受けることが知られている。発がんの危険率を低下させることは、がん化に繋がる外的な要因を排除するかあるいは制御することである。これはエピジェネティック研究の成果の応用により可能であると考えられる。

がん研究分野のエピジェネティック研究は、図表7に示すようにがんの基礎研究分野の「発がん機構」研究に属する。そして、その研究成果はがん予防研究に直接的に貢献する。

国際的なエピジェネティック・がん研究は、欧州においては約5年前からポストゲノム研究の一環としてEU間国際協力の下に進められている。米国においても研究プロジェクトが実施されている。

一方、残念ながら日本においては、エピジェネティック・がん研究の国際的なプロジェクトや国内の複数研究施設の協力による研究プロジェクトは実行されていない。

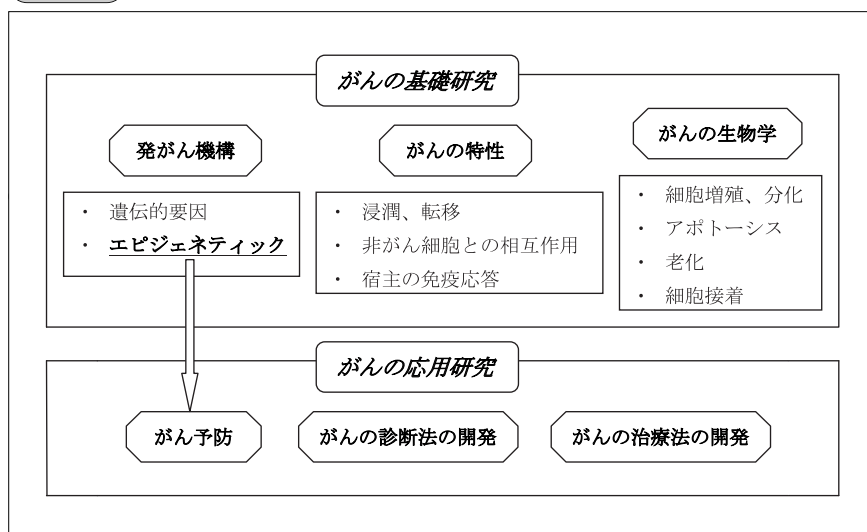
5 - 1

米国のエピジェネティック研究の動向

米国においては、エピジェネティック大規模プロジェクトこそ実施されていないが、2001年8月にNIH、FDA、アメリカ栄養科学学会の後援によるワークショップ「食事、DNAメチル化プロセスと健康（Diet, DNA methylation processes and health）」、同年12月にNCI（米国がん研究所）のがん予防部門の研究者が中心メンバーになったワークショップ「がん予防分野のエピジェネティック研

究：早期発見とリスク査定（Epigenetic in Cancer Prevention: Early detection and risk assessment）」、さらに2003年1月にはゴードン会議の一部門である「がんの遺伝学研究およびエピジェネティック研究（Cancer genetics & epigenetics）」が開催され、DNAメチル化等のエピジェネティックな現象とがんに関する研究発表と今後の研究展開が討論された。さらに2002年9月には、NIH研究グラント（R 01およびR 21）として「食事、DNAメチル化および他のエピジェネティック現象、がん予防（Diet, DNA methylation and other epigenetic events, and cancer prevention）」というテーマに関連する新しい研究テーマ募集がアナウンスされた。NCIは2004年度予算として、約2.5百万ドル（3億円）をこの研究グラントに使用する。

図表7 がん研究マップ



科学技術動向研究センターにて作成

5 - 2

欧州のエピジェネティック研究戦略（ヒトエピゲノムプロジェクト）

欧州はいち早くエピジェネティック研究に乗り出している。ヒトゲノム中のエピジェネティック情報を明らかにするために、1999年にヒトエピゲノム・コンソーシアム（Human Epigenome Consortium）が設立された。サンガーセンター（英国）、Centre National de Genotypage（フランス）、ドイツがん研究センター、ベルリン工

科大学、マックスプランク分子遺伝学研究所（ドイツ）が参加している。

ヒトエピゲノム・プロジェクトの第一段階として、メチル化の詳細な地図づくりとそれに必要な手法の開発に主眼を置いている。プロジェクトチームには、ベルリン（ドイツ）に基盤を置くバイオテクノロジー会社である Epigenomics が加わっている。

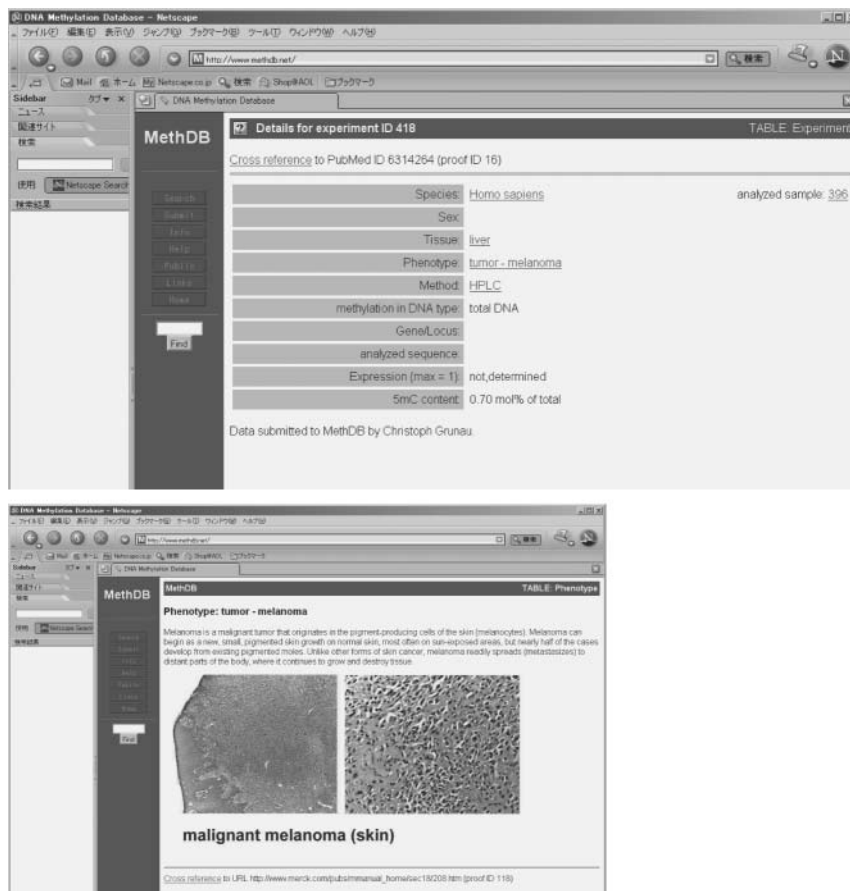
Epigenomics 社 (<http://www.epigenomics.com>) は、個人に応じた医薬品の開発など、ゲノムを利用した革新的な技術の創造を目的としている。そして共同研究を通じて国際的なネットワークを形成し、現在ではシアトル（米国）に支社を置いて米国内のネットワークも強化している。

5 - 3

ドイツによる DNA メチル化データベースの構築 (MethDB)

ドイツは、世界で先駆けて DNA メチル化データベースを構築した^{14, 15)}。これは、MethDB と言い、一般がアクセスできるメチル化データベースとしては初めてのものである (<http://www.methdb.net>)。2002年9月4日現在で、6,667個のメチル化のデータが収載されてお

図表 8 DNA メチル化データベース（例：悪性黒色腫の肝臓転移）



DNA メチル化データベースの HP より

り、これらには 46 種の生物種、160 の組織、72 の表現形質が含まれている。データベースのアクセス件数／月は毎月増加し、2000 年 6 月に 810 件であったのが 2002 年 7 月には 8884 件にまで増加した。また、DNA メチル化のパターンや位置情報だけでなく、マイクログラフで表現形質を示した細胞組織

学的な画像データも利用できるなど工夫が凝らされている（図表 8）。

このデータベースには、がん細胞中の DNA メチル化のデータが多く収載されており、今後のエピジェネティック・がん研究において重要な情報源となることが期待されている。

6. 提言

エピジェネティック・がん研究は、現在、発展段階の研究であるが、国際的な動向からみると急速に進展および拡大しつつある分野であると考えられる。わが国としては、国際的な研究の潮流に注意を払いながら、必要に応じて国内の研究体制を整備する必要がある。

今後のエピジェネティック・がん研究の研究体制の整備を考える上で、国家主導で行うべきだと考えられる事を以下に挙げる。

① エピジェネティック・がん研究の拡充

がん研究の観点からの分野横断（医学、理学、食品・栄養学、保健学、疫学など）的なエピジェネティック研究プロジェクトチームを構成する。

② 国内的なヒトエピジェネティックデータベースの構築

各研究機関や大学で別々に行わ

れている DNA メチル化等のエピジェネティックに関する研究データを集約し、疾患の予防・診断研究に役立てる。データベースは必ずしも一元化する必要はなく、サテライト方式で複数機関が相互アクセス可能な方式をとっても良い。

③ エピジェネティック研究をポストゲノム研究の一つに位置づける

現在のわが国のポストゲノム研

究は、タンパク質の構造・機能解析やSNPs等に焦点をあてているが、エピジェネティック研究もポストゲノム研究の一つの柱として考えるべきである。

参考文献

- 1) Jones, P.A. and Laird, P.W., Cancer-epigenetics comes of age, *Nature genetics*, 1999, 21(2) : 163-167.
- 2) Wolffe, A.P., Matzke, M.A. Epigenetics: Regulation through repression. 1999 *Science* 286 (5439) : 481-486.
- 3) Yan, P. S., Perry, M. R., Laux, D. E., Asare, A. L., Caldwell, C. W., Huang, H.-M. CpG island arrays: an application toward deciphering epigenetic signatures of breast cancer. 2000 *Clinical Cancer Research* 6 : 1432-1438.
- 4) Trinh, B. N., Long, T. I., Laird, P. W. DNA methylation analysis by MethyLight technology. 2001 *Methods* 25(4) : 456-462.
- 5) Esteller, M., Corn, P.G., Baylin, S.B., Herman, J.G. A gene hypermethylation profile of human cancer. 2001 *Cancer Research* 61 : 3225-3229.
- 6) Croce, L. D., Raker, V. A., Corsaro, M., Fazi, F., Fanelli, M., Faretta, M., Fuks, F., Coco, F. L., Kouzarides, T., Nervi, C., Minucci, S., Pelicci, P. G. Methyltransferase recruitment and DNA hypermethylation of target promoters by an oncogenic transcription factor. 2002 *Science* 295 : 1079-1082.
- 7) Jones, P. A., Gonzalgo, M. L. Altered DNA methylation and genome instability: A new pathway to cancer. 1997 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94 : 2103-2105.
- 8) Chen, R.Z., Pettersson, U., Beard, C., Jackson-Grusby, L., Jaenisch, R. DNA hypomethylation leads to elevated mutation rates. 1998 *Nature* 395 : 89-93.
- 9) Davis, C. D., Uthus, E. O., Finley, J. W. Dietary selenium and arsenic affect DNA methylation in vitro in Caco-2 cells and in vitro in rat liver and colon. 2000 *Journal of Nutrition* 130 : 2903-2909.
- 10) Halsted, C. H., Villanueva, J. A., Devlin, A.M., Niemela, O., Parkkila, S., Garrow, T. A., Wallock, L. M., Shigenaga, M. K., Melnyk, S., James, S. J. Folate deficiency disturbs hepatic methionine metabolism and promotes liver injury in the ethanol-fed micropig. 2002 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99 (15) : 10072-10077.
- 11) Sohn, K.-J., Stempak, J. M., Reid, S., Shirwadkar, S., Mason, J.B., Kim, Y.-I. The effect of dietary folate on genomic and p53-specific DNA methylation in rat colon. 2003 *Carcinogenesis* 24(1) : 81-90.
- 12) Okoji, R. S., Yu, R. C., Maronpot, R. R., Froines, J. R. Sodium arsenite administration via drinking water increases genome-wide and Ha-ras DNA hypomethylation in methyl-deficient C57BL/6J mice. 2002 *Carcinogenesis* 23(5) : 777-785.
- 13) Song, J., Sohn, K.-J., Medline, A., Ash, C., Gallinger, S., Kim, Y.-I. Chemopreventive effects of dietary folate on intestinal polyps in *Apc*^{+/−} *Msh*^{−/−} mice. 2000 *Cancer Research* 60 : 3191-3199.
- 14) Grunau, C., Renault, E., Rosenthal, A., Roizes, G. MethDB- a public database for DNA methylation data. 2001 *Nucleic Acids Research* 29(1) : 270-274.
- 15) Amoreira, C., Hindermann, W., Grunau, C. An improved version of the DNA methylation database (MethDB) . 2003 *Nucleic Acids Research* 31(1) : 75-77.

その他の参考文献等

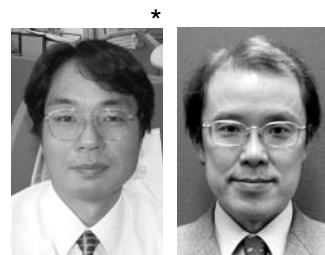
- 細胞の分子生物学第3版、Alberts, B., Bray, D., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Watson, J.D.
- 米国がん研究所 (NCI) の公式ウェブサイト <http://www.nci.nih.gov/>
- The Epigenome, Beck, S. and Olek, A., Wiley-vch 2003.

.....

特集②

RFIDの動向

情報通信ユニット 小松 裕司*
客員研究官 山田 肇



1. はじめに

1 - 1

やがてあらゆる“物”が
ネットにつながる

インターネットは、今から30年以上も前に軍事目的で研究が開始され、当初は米国内のわずか4箇所の研究機関を結ぶものであった。その後、学術研究を目的として発展、90年代に入り、商用として営利団体が参入する道が開かれてからは、パーソナルコンピュータ（PC）の性能向上および基幹ネットワーク回線整備の効果もあり、地域的にも、階層的にも爆発的に広く普及していく事になる。近年では、PDAやインターネット接続機能のついた携帯電話等のモバイル情報端末のユーザーが拡大し、さらにデジタル家電のネットワーク接続も実用化が始まり、まさに個人がいつでもどこでもインターネットに接続可能なユビキタス・ネットワーク社会が到来しつつある。

しかし、これはまだ最初のステップに過ぎないとも言われている。

これまでネットワークを形成してきたこれらの機器は、コンピュータに代表される電子機器であって、その世界は“仮想”のものとして、現実世界の“物”とは切り離されてきた。ネットワークを流れるデータは、あくまでも電子機器が有する情報であり、その背後

に存在する現実の“物”に関するデータは、一部でやり取りされるに限られていた。

今、あらゆる電子機器のネットワーク接続が進行していく中で、次のステップとして、この現実の“物”がやがてネットワークとつながる事が現実味を帯びて来ているのである。

1 - 2

追跡可能性への要求の高まり

このような技術的な発展とは別に、あらゆる物の動きを全て追跡する事に対する社会的要求が、以下に列挙する理由から急速に高まって来ている。

- ①サプライ・チェーン・マネジメントの効率化
- ②万引き等の不正行為による商品の数量減少防止
- ③セキュリティ確保、テロ対策強化
- ④食品等の安全性の確保

流通業においては、利益を確保する為に在庫を最小にしながら商品の欠品を防ぎ販売機会の損失を無くすサプライ・チェーン・マネジメントが重要である。また、米国では抜き荷や万引き・盗難による商品の流通・販売段階での数量の減少が相当量に上るとの報告¹⁾もあり、特に生産・流通業者側か

らの要求として、商品履歴の追跡可能性（トレーサビリティ）の確保は緊急の課題である。これが99年にP&G、ジレット、Wal-Mart等の大手製造・流通業者を中心スポンサー企業として、バーコードに替わる流通管理システムの開発を目的に、オートIDセンター²⁾なるコンソーシアムが設立された動機となっている。

また、同時多発テロとこれに続いて発生した炭素菌事件以降、セキュリティ強化の為に米国内に流入もしくは米国内で流通する全ての物流について、履歴を含めてリアルタイムに管理する事への要求が米国政府内で高まり、ここへ来て対象は商品以外にも大きく拡大し、全ての物となりつつある。一方、日本においてもO-157による食中毒の多量発生やBSE（狂牛病）および一連の食品の原産地の詐称等に対して、消費者側からも商品の安全性を確保する為にトレーサビリティへの要求が高まっている。

一方で技術的には、コンピュータやネットワークの発展に加え、実装を含めた近年のLSI技術の進展により、全ての物に識別用の小型ICチップを埋め込む事がコスト的にも十分に実用的な技術となりつつある。

以上の様な背景で、ネットワークが現実の“物”と直接情報交換を行なうRFID（Radio Frequency

Identification；無線を用いた自動識別）技術が、最近注目されている。これまであくまでも“仮想”の世界でしかなかったネットワークが、現実の“物”と情報交換を

行なう様になると社会的な影響も大きい。個人の生活環境の変化を含め、今までには無かった新たな価値やサービス、課題までも生じる事が予測される。本稿では、こ

のRFIDに関する最近の動向を概観するとともに、この技術がもたらす社会的な影響についても考察する。

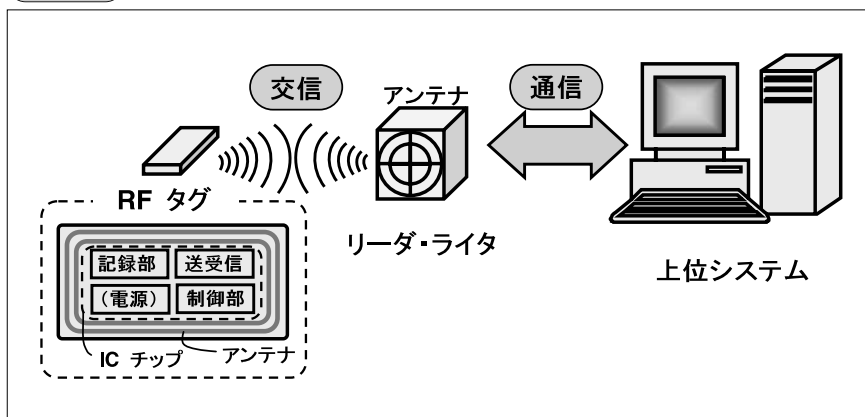
2. RFID とは

2 - 1

システムの基本構成

RFIDのシステムの基本構成を図表1に示す。ICチップとアンテナから構成され固有のIDを有するRFタグと、このIDの読み取り機であるリーダ・ライタとが無線により交信して情報の交換を行なう。一般に物に埋め込まれた場合RFタグと呼ばれるが、機能が同じでも人が所有した場合は“非接触ICカード”と呼ばれる事になる。ここでRFタグとリーダ・ライタとの情報の交換は、人手を介さず自動的に行なわれるのが特徴である。既存のバーコードにおいては、タグの情報読み取りには人手を介して行なう必要があり、また、その情報は読み取り専用であるが、RFIDではRFタグの情報を

図表1 RFID システムの基本構成

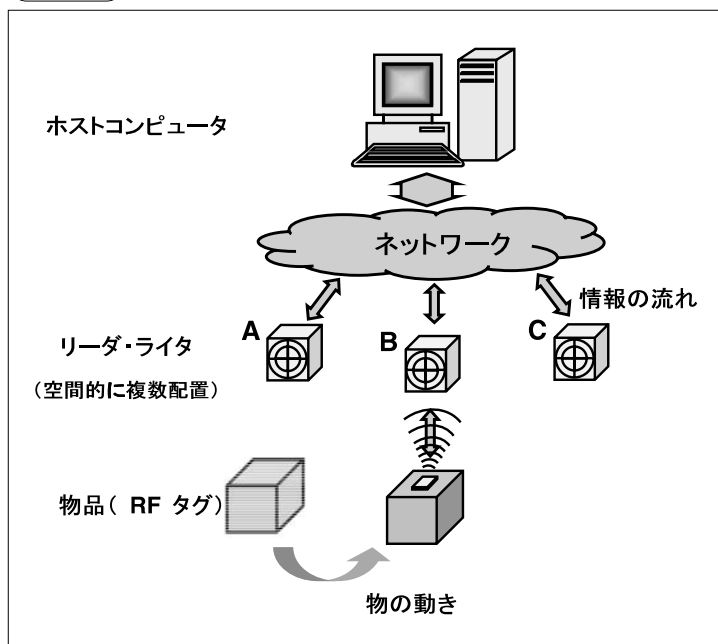


科学技術動向研究センターにて作成

必要に応じて書き換える事が出来る点が異なる。RFタグのICの駆動用電源は、リーダ・ライタのアンテナを通じて電磁誘導により与えられる。RFタグが電池を内蔵する場合もある。RFタグを構成するICチップには、読み出し専用もしくは書き換えが可能な記憶装置が内蔵される。

無線交信により、自動的にRFタグに読み書きされるデータは、その書き換えの経歴も含めてネットワークを通じて上位のコンピュータとやり取りされる。そしてこれらの経歴を含むデータは、ネットワーク上のホストコンピュータやRFタグ自身が内蔵する記録装置等に保存され、必要に応じて外部から参照される事になる。

図表2 物の動きと情報の流れ



科学技術動向研究センターにて作成

2 - 2

物の動きと情報の流れ

空間的に離れて複数のリーダ・ライタが設置され、RFタグは最も近くのリーダ・ライタと常に交信し続ける状態を考える（図表2）。あるIDを有するRFタグが埋め込まれた物が、どのリーダ・ライタと交信しているかを常にモニターする事によって、その物が現在どこにあるのかを、リーダ・ライタの位置情報から割り出す事が可能となる。物の移動によって交信先のリーダ・ライタが変わっても、同様に交信状態をモニターし続ける事によって時間的な位置

図表 3 情報の処理に関する幾つかのケース

	RF タグの機能	履歴情報	RF タグコスト	ネットワーク負荷
ケース 1	ID 番号のみ (読み出し専用記憶素子)	ネットワークを介して ホストコンピュータに保存	小	大
ケース 2	ID 番号と履歴情報 (書き換え可能な記憶素子)	RF タグ内に保存	大	小
ケース 3	ID 番号と履歴情報 (書き換え可能な記憶素子)	RF タグおよび ホストコンピュータに保存	中～大	中～大

科学技術動向研究センターにて作成

情報の変化、つまり経歴を含んだ物流情報を割り出す事が可能となる。以上の様にして、RF タグとリーダー・ライタとが常に交信し続ける事により、ネットワーク上を行き来する位置情報と実際の物の位置が、完全に同一のものとなるのである。

ここで、現実の物の位置情報とネットワーク上のデータとをリンクさせて把握する場合、データ処理に関して、RF タグとホストコンピュータとで作業をどの様に分担するかによって、図表 3 に示す 3 つのケースが考えられる。

図表 3 でケース 1 は、物流の履歴に関する情報を全てネットワークを介してその先のホストコンピュータに蓄える場合で、RF タグの機能を最小にする事が可能となる。ケース 2 は、逆に RF タグの機能を最大にした場合であり、ケース 3 はケース 1 と 2 とが混在する場合である。

ケース 1 は、RF タグの機能を絞り込む事が出来るので、RF タグのコストを最も下げる事が可能になり、バーコードの置き換えのようにコストが優先される分野から実用化が進むと考えられる。逆にケース 2 の場合は、RF タグの機能は最も複雑化しコストも高くなるが、人が持つ IC カードの様にセキュリティやプライバシーが重要視される場合や、ネットワークの負荷を低減させる必要がある場合は有効である。このどちらの形式を採用するかについては、現在、技術の標準化を含めて開発競争が行われている。

また、情報はネットワークを介してホストコンピュータとやり取りされるが、このネットワークはグローバルなインターネットの場合もあるがローカルな LAN であっても良い。ただ、ネットワークがどの様なものかによって、その構成や RF タグのデータ構造、流

れる情報量等が変わって来る事になる。インターネットを介してグローバルに物流情報をやり取りする技術は、これから発展していく技術であろう。閉じたネットワーク内でも物品の ID 番号の読み取りのみであれば、バーコード置き換えを目的とした RF タグと POS^(注1) システム等を用いて、ローカルなシステムでは既に実用化されている場合も多い。図表 4 に従来のバーコードとこの置き換えを狙う RFID との機能を比較して示す。

(注 1) 販売時点管理 (Point Of Sales)。店舗で商品を販売する毎に商品の販売情報を記録し、集計結果を在庫管理やマーケティング材料として用いるシステムのこと。

2 - 3

歴史と近年の動向

図表 4 バーコードと RFID との機能比較

システム	バーコード	RFID	備考
読み取り方式	光学的	電磁誘導	
最大読み取り距離	～ 50cm	数 m	RFID は電波の周波数等に依存
読み取り時の人手	要	不要	RF タグではレジに人が不要となる
環境の影響	大	小	表面の汚れ等に対して
データ容量	1 ～ 100Bytes	128 ～ 8 KBytes	2 次元バーコードは、数 KBytes
複数一括読み取り	不可	可	
不正複製	容	難	
コスト	0 ～ 数円	～ 10円	RFID は読み取りのみの場合の現状値
読み取り回数	少	多	

科学技術動向研究センターにて作成

RFID は、第 2 次大戦中に英国が敵味方戦闘機の識別の為に開発したのが起源とされている。その後、70 年代に米国で家畜の管理や鉄道車両識別等の応用に向けた基礎技術の研究開発が進み、80 年代に入って日本の製造現場での物流の管理自動化に応用されるようになる。90 年代には香港やシンガポールで従来の磁気カードに替わる非接触 IC カードを用いた自動改札システムが実用化され、一般に認知されるに至っている。

近年では国内においても非接触

図表 5 RFIDの主な事例

分野	用途もしくはシステム名	主体	状況	形体
乗車券	自主運行バス運賃清算 代官山循環バス運賃清算 バス乗車券・定期券 出改札「Suica」	静岡県磐田郡豊田町 東急トランセ 山梨交通 JR東日本	1997.10導入済み 1998.07導入済み 2000.02導入済み 2001.11導入済み	ICカード ICカード ICカード ICカード
高速道路	自動料金収受「ETC」	日本道路公団等	2001.03導入済み	ICカード
スポーツ・レジャー	スキー場ゲート プール内キャッシュレス 施設内情報管理	志賀高原索道協会 豊島園 箱根小涌園ユネッサン	1992.11導入済み 1996.06導入済み 2001.01導入済み	ICカード RFタグ RFタグ
入退出管理	入退出・食堂清算	東芝小向工場	1989.02導入済み	ICカード
車両管理	地下駐車場入出門管理	恵比寿ガーデンプレイス	1994.10導入済み	ICカード
物流	航空手荷物管理 商品履歴の追跡	国土交通省、空港公団 経済産業省	2001.10実証実験 2003.02研究会発足	RFタグ RFタグ
小売り	書籍販売管理	出版業界団体	2003.03構想開始	RFタグ
その他	列車番号読み取り 社員食堂オートレジ 回転寿司清算 図書館システム	JR東日本、JR東海 日鐵商事 日本クレセント 宮崎県北方町	1991導入済み 1994.09導入済み 2000導入済み 2001.05導入済み	RFタグ ICカード RFタグ RFタグ

参考文献³⁾を元に科学技術動向研究センターにて作成

ICカードの実用化が進みつつある。例えば、JR東日本Suicaに代表される自動改札システムや社員等の入退出管理、スキー場のオートゲートおよびキャッシュレスシステム、高速道路の自動料金収集(ETC)システム等である。

RFタグに関して日本で最も実績がある長波帯(125kHz)では、ユニフォームのクリーニングの入出庫管理、鉄道コンテナ、回転寿司の清算等の応用例がある。図表5に代表的な事例をまとめた。これまで日本では電波法による規制により、短波HF帯(13.56MHz)での電波の出力が海外に比べて抑えられていた。これにより、通信距離が30cm程度しか取れ無かつ

た為にRFタグに関しては、海外に比べると普及が遅れていた。しかし、2002年9月、日本においてもこの帯域での電波法による規制が海外と同等レベルに改正されるに至って、RFタグに関しても、今後応用事例が増えて行くと予測される。

2 - 4

規格化をめぐる動き

これまでRFIDに関しては、例えば非接触ICカードが磁気カードを、RFタグがバーコードをそれぞれ置き換えている様に、従来システムへの機能付加、信頼性向上を目的とした応用から実用化が

進んでいる事が分かる。そして近い将来、この様な従来型のローカルなネットワークを利用するシステムからネットワークの相互接続も含めて、より広い範囲をカバーするグローバルなネットワークを利用するシステムへと変化していくものと考えられる。この様にRFID技術がより広範にその適用範囲を広げていく場合、問題となるのは技術の規格化である。

図表6にRFIDに関する最近の規格化の動きを示す。

例えばRFタグに関する物理的な通信規格については、ISOを中心に2003年中に国際規格を発行する予定で活動が進められているが、このISOによる規格作成とは別にオートIDセンターは、今年9月に第1版の技術提案を行なう予定である。日本においては、TRONプロジェクト活動の中で将来のユビキタス社会の実現に向けて、ユビキタスIDセンターがこの3月に発足している。この様にRFID技術の規格化に関しては、今の所統一された動きは見られず、複数の機関がそれぞれドラフトを作成している状況にある。

図表 6 各機関の活動状況

機関	年					
	'99	'00	'01	'02	'03	'04
ISO国際標準化機構／ IEC国際電気標準会議					RFタグ規格(通信規格) ▼最終案(5月) ▼発行(11月)	
オートIDセンター (MIT)	▼発足				▼日本拠点設立(慶応大、1月) ▼技術提案(9月)	
ユビキタス IDセンター (TRONプロジェクト)					▼発足(3月)	

科学技術動向研究センターにて作成

3. 規格標準化の動向

3 - 1

使用周波数帯

RFIDは電波を用いてRFタグとリーダ・ライタとが交信するので、交信方式等の物理的な仕様に加えてまず、この使用する電波の周波数を揃えなければならない。物流が国を超えて行なわれる現代にあって、複数国で共通のRFタグを使用する場合、物に埋め込まれるRFタグについて国際的な標準規格の作成が不可欠である。しかしながら、RFタグとリーダ・ライタ間のこの最初の物理インタフェース規格（エア・インタフェース）である使用周波数帯が、各国における周波数帯の割り振りの影響を受け、標準化の大きな障害となっているのである。

まず、技術的な観点からどの周波数帯を使用すべきであるかについて、電波の到達距離、指向性、アンテナサイズ等から決まる用途に応じた使い勝手から決定される。非接触ICカードは人が持つものであり、ある程度の大きさの方が使い易い。磁気カードと同じカード形状で置き換えが進む非接触ICカードでは、アンテナは比較的大きくても良く、短波HF帯（13.56MHz）がISOによる標準規

（注2）オートIDセンターでは915MHz、EUでは868MHzでの使用を前提とした技術開発が進められている。

（注3）国際標準化機構（ISO）と国際電気標準会議（IEC）との合同の下部組織である合同専門委員会（Joint Technical Committee；JTC 1）の中での分科委員会（Sub Committee；SC）で国際規格が制定されている。RFIDに関しては、技術分野「データ取得および識別システム」で議論されていて、分科委員会はSC17とSC31であるが、この委員会の幹事国はそれぞれ英国と米国となっている。

格化が進んでいる事もあり、実用化が進展している。

一方、物品に埋め込むRFタグは、バーコードの置き換えを考えた場合、低コスト化の為にはアンテナを含めRFタグは小型化の方向に進まざるを得ない。アンテナが小型化すれば、より高い周波数で使用するのに適したアンテナ特性となる為、HF帯よりも高い周波数が求められる事になる。HF帯の13.56MHz程度の周波数では、RFタグとリーダ・ライタ間の交信は電磁誘導により行なわれる事になるが、アンテナの指向性が悪く、かつ交信距離もせいぜい数十cmと短い。これよりもRFタグが埋め込まれる対象物が大きい場合、読み取りが出来なくなる場合があり、この事からもHF帯は望ましくない。一方マイクロ波帯（2.45GHz）の様な高い周波数では水分子による電波の減衰が大きく

なり、水分を含む食品等への適用が制限されてしまう。これらの理由から、RFタグに最も好ましい周波数帯として、電波の指向性があり、交信も比較的距離を確保する事が可能なUHF帯（注2）が有力候補となる。

ISO/IECでの国際規格策定（注3）においても、低周波数から高周波数側へ順に5.8GHz帯までのエア・インタフェース規格の作業原案の提案がなされた後、追加で860～930MHz（ISO/IEC 18000 - 6）、433MHz（ISO/IEC 18000 - 7）が米国や欧州から提案されている。図表7にISO/IECでのエア・インタフェース物理規格（ISO/IEC 18000）の審議進捗を示す。ISO/IEC 18000 - 4までが、作業原案から最終委員会案まで2年以上の時間をかけて審議が行なわれているのに対して、遅れて提案されたISO/IEC 18000 - 6、18000 -

図表7 エアー・インタフェース物理規格審議進捗

名称	番号	周波数	作業原案 (WD)	委員会案 (CD)	最終委員会案 (FCD)	承認 (FDIS)	発行 (IS)
エアー・ インタフェース	18000 - 1	(一般パラメータ)	2000.12	2001.09	2003.02	2003.05	2003.08
	18000 - 2	135kHz以下	2001.03	2002.03	2003.02	2003.05	2003.08
	18000 - 3	13.56MHz	2000.12	2002.03	2003.02	2003.05	2003.08
	18000 - 4	2.45GHz	2000.12	2002.03	2003.02	2003.05	2003.08
	18000 - 5	5.8GHz	2002.06	2002.11	取り下げ		
	18000 - 6	860 - 930MHz	2002.06	2002.11	2003.05	2003.08	2003.11
	18000 - 7	433MHz	2003.01	2003.01	2003.05	2003.08	2003.11

WD：Working Draft CD：Committee Draft FCD：Final CD FDIS：Final Draft of IS IS：International Standard

参考文献^{3, 4)}を元に科学技術動向研究センターにて作成

7は急速に規格が策定されているのが分かる。これは、市場の強い要求に答えたものと考えられるが、標準規格の策定を急ぐ事は個々の規格案を推進する特定の企業をバックアップする事になりかねない。特に、日本では、ISO/IEC 18000 - 6、18000 - 7のどちらの周波数とも現在別の用途^(注4)に割り振られていて、このままでは既存システムに影響を与えずに使用する事は出来ない事からも、わが国の主張を反映させて行く事が必要である。

米国は既にテロ対策として、04年以降米国が輸入する全ての物品に米国が指定するRFタグを添付させる事を義務付ける方向に動いている。このRFタグが日本国内で使用するものと互換性が無いものになれば、米国への輸出比率が大きな国内産業に対する経済的影響は計り知れない。また、米国もしくは他の国からの日本への輸入品に関しても米国指定規格のRFタグが貼られた場合、RFタグに正しくデータが記録されているかさえもその周波数が使用できなければ、日本国内では検証できない。当面はデュアル・モード^(注5)等でコストアップと引き換えに日本が独自のRFタグを貼るような対応をしていくにしても、恒久的には周波数帯の割り振り見直しを含めて、行政側の対応が必要と考えられる。

3 - 2

コード体系

周波数に代表されるRFIDの物理的な通信方式に続いて、規格の統一化が必要となるのは通信によりやり取りされる情報である。これは、バーコードでそれぞれの物品に付与されるユニークなコード番号に相当する。現在バーコードについては、商品コード体系が幾つか存在するが、現状コード体系は業界によってまちまちであり、また、生産や流通の過程で変わる荷姿や仕様に対応出来ていない。これに関しては、昨年11月に米国コードセンタ（UCC^(注6)）が加入してようやく統一組織となった国際商品コード協会（EAN^(注7)）にて製品単品や各荷姿の集合単位に対応した規格化の審議が開始された所である。RFタグのコード体系に関しても、ほぼこのバーコードのコード体系に沿って、場合によっては上位互換性のあるものになると予測される。この場合、注意しなければならないのは、そのコードのデータ長である。RFタグが、既存のバーコードを置き換える時の最大の課題はそのコストである。アンテナやICチップの小型化⁵⁾により、極限までコストを下げる技術開発が現在行なわれている所であり、このICチップの記録部の記録容量も必要最

低限として、付与されるコードのデータ長も必要以上に長くすべきでは無い。

また、コードのデータ長は、ネットワーク上を流れるデータ量とも直接関連するので、どの様なデータをネットワーク上でやり取りするかにも依存する。これが、将来的にはネットワークやホストコンピュータの構成にも影響を与えかねない。全ての物流情報がインターネット上を行き来する様なれば、送信・受信頻度は現在のPC間のそれに比べて著しく増加する可能性がある。もちろん、鉛筆1本に至るまでグローバルなインターネットに直接つなげる必要性は、無いかも知れない。国境を越えて輸出入が行われる物流についても、コンテナ、パレット等の実際に生ずる物流の単位で情報を把握出来れば良く、一つ一つの物の動きに関しては、梱包の時にローカルに把握出来れば良いと思われる。

ところで日本国内では、オートIDセンターとユビキタスIDセンターそれぞれの活動について、報道されることが多くなっている。オートIDセンターでは96ビットのコードを個々の物に与えようとしていて、最大256ビットまで拡張する計画もある。そしてこのコード付与をEANと協力して進めようとしているところからも、世界のデファクトを狙っていること

(注4) 日本では、433MHzはアマチュア無線、860～930MHzは携帯電話にそれぞれ割り振られている。

(注5) 異なる2つの周波数帯で使用出来る様にしたRFタグ。部品点数が増えコストが上昇する。

(注6) 米国コードセンタ（Uniform Code Council）。1973年設立、加盟2カ国（米国、カナダ）。付与されたコードは、UPC（Universal Product Code）と呼ばれる。

(注7) International Article Numbering Association、1977年欧州諸国が主体となって設立（European Article Number）し、その後世界的に加盟国が増加した国際的な商品コードの管理機関。現在、加盟97カ国。

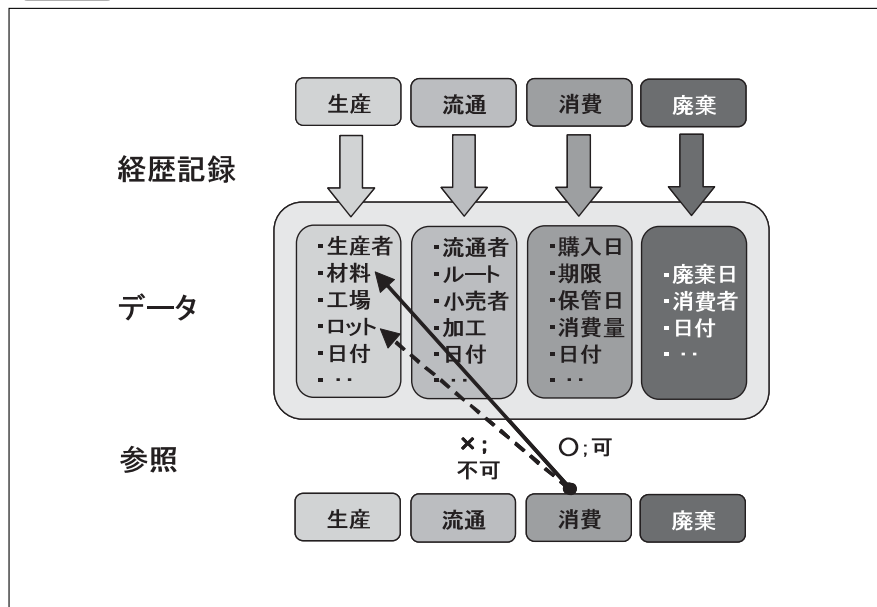
がわかる。オートIDセンターが提案する技術では、物にはコードだけが付与され、それ以外の情報は全てネットワーク上のホストコンピュータに収められる（図表3のケース1）。これに対して、ユビキタスIDセンターが提案する技術では、RFタグには高度な機能を持たせ、端末がその場で情報を処理する方向を目指している（図表3のケース2）。これにより、ネットワークの負荷が低減し、RFタグもリアルタイムに情報処理を行なう事が可能となる。しかし、個々のRFタグに多くの機能を盛り込む事は、タグのコストアップにつながり、あらゆる物にこのRFタグを埋め込むには、コスト面からの課題も多い。ネットワーク機能を最大限活用しようとするオートIDセンターとむしろマイクロコンピュータと呼ぶべきRFタグに機能を集約するユビキタスIDセンターとで、今後も開発競争が続くものと考えられる。

3 - 3

データの利用制限

従来のバーコードでは物に付与されたある1つのコードを読み取る回数は、読み取りに人手を要する事もあり、そう多くは無い。レジでの清算に代表される様に通常は1回限り、多くてもせいぜい数回の読み取りであろう。よって、この読み取られた情報の活用も限られたものとなり、例えばレジを

図表8 履歴データの参照についての概念図



科学技術動向研究センターにて作成

通過したかどうかである。しかしながらRFIDの場合、読み取りはリーダ・ライタの設置数に応じて、随所で自動的に行なわれる事になる。そしてこの読み取られた物流に関するあらゆる履歴データは、ネットワーク上のホストコンピュータやもしくはRFタグ自身が内蔵する記憶部に随時蓄積されていく事になる。

ここで蓄積された物流情報は、データベースとしてはあらゆる物を含むべきであろうが、このデータベースの参照に関しては、それぞれの利用者毎の制限が必要になるであろう（図表8）。例えば食品の場合、アレルギー物質の有無を含めてどの様な材料によって製造されたかは、消費者が最も必要とする情報であり、企業秘密の部

分を除いて、消費者からの参照を許可しなければならない。しかしながら例えばどの工場のどのロット番号で製造されたか等の詳細な生産管理に関する情報は、消費者に必ずしも直接公開する必要は無い。また、個々の消費者が商品を購入した後の物流情報に関しては、プライバシーの問題も生ずるので、消費者自身を除いて参照は制限すべきである。

これはつまり、蓄積された物品の経歴等に関するデータはその利用者によって、参照制限が可能となる様に最初から構造化されているか、もしくは、データが保存される時に階層化されて行なわれなければならない事を示している。

4. RFIDのビジネスモデル

このRFID技術が今後広く普及していくか否かは、この技術が既存のビジネスの効率をどの様に改善し、どの様な新たな付加価値を生み出していくかによって決まるであろう。米国企業がRFIDを導入する最初の目的は、流通のサプライ・チェーン全体における効率

の改善とされているが、既存のバーコードの置き換えを考えた場合、作業の効率化、人為ミスの防止、流通におけるさまざまな段階での確認作業の省略等随所で改善が見込めると考えられる。サプライ・チェーン以外では、例えば以下の様な領域での改善も考えられる。

- ①危険物扱い業における安全性の確保、人為ミスの防止
- ②製造業における生産性向上、装置ダウンタイムの短縮化
- ③小売業における顧客サービスの向上

バーコードが導入され、商品情報がキー入力を用いずバーコードの読み取りにより行なえるようになり、サプライ・チェーンの効率化が達成されたであろう。これに加えてRFIDは基本的に人手を介在せずに端末機への情報入力が行なわれる為、より一層の作業の省力化、ミス削減、迅速化が行なわれる事になる。物流面でこの技術が普及拡大していく判定基準は、導入コストに見合う業務効率の改善が行なわれるかもしくは新たな付加価値を生み出していくかどうかによる。

ビジネスの利益改善については、不正行為による商品の数量減少に関しても考察する必要がある。今年始めジレット社がRFIDの市場テストとして、むこう3年間に5億個のRFタグを購入する計画を発表して話題となった。同社はサプライ・チェーン・マネジメントの改革を導入目的と発表しているが、本当の狙いが不正行為によ

る商品の数量減少防止にあるとするレポートも公表されている⁶⁾。小売業の平均利益率が、3%程度であるのに対して、内部および外部の者を合わせた不正行為による数量減少は売上高の2%に達すると言う。不正行為による数量減少に関しては、盗難による直接の被害と、システム上の商品数量と現物との差から生じるサプライ・チェーンへの影響との2重の被害を考えなければならない。日本においても、書店における万引き被害が1店舗あたり平均年間210万円（売上高の1~2%）と報告⁷⁾されており、書店にとっては死活問題になりつつある。しかしながら、RFIDの導入を巡っては、利益を享受する者とコストを負担するものが一般的には一致しない為、コストは“誰が負担するのか”が議論になっている。これは、1企業や1店舗の課題では無く、サプライ・チェーン全体に関わる課題でもあり、長期的な視野からも仕様の標準化

と合わせて業界全体で考えていかなければならない課題である。

また、国土交通省を中心に航空手荷物をRFIDで管理していこうという動きも進んでいる。家庭でスーツケースをパッキングして運送業者に手渡すときにRFタグをつける。後は自動的に航空会社に引き継がれて、到着地でスーツケースを受け取るといったサービスが考えられている。この事例では、もちろん旅行者の利便が向上するが、運送業者や航空会社にとっても、いちいち伝票を起こし、それを引き継いでいくといった手間が省くことができるという利益がある。その上、出入国管理についても、危険物や麻薬などを監視することが容易になる可能性がある。このようなケースでは旅客、運送会社、航空会社、出入国管理機関と四者がともにこのRFIDの運用について考えていくべきである。

5. 社会に普及していく為には

今年8月から住民基本台帳カードの交付が予定されている。この非接触ICカードには住民票コードや本人を確認する為の重要情報が書き込まれる為、これに用いられるICカードに対して、十分なセキュリティ対策が必要なのは理解出来よう。ところが、非接触ICカードで先行したSuicaでは、専用の小さな読み取り機器がすでに市販されており⁸⁾、それを用いると、いつ、どの区間でSuicaを使用したかを簡単に読み取ることが出来るのである。図表9はパソコン上に表示されたSuicaの使用状況の例である。本人が自分のカード内容を読み取るだけなら良いが、状況によってはプライバシーを侵す危険もあるだろう。

一方で物に付けられるRFタグに関しては、どうであろうか。バ

ーコードの置き換えを狙うRFタグは低価格が要求され、読み出し専用となる為、これ自体に情報は蓄積されない。しかしながら、ネットワークを通じて、ホストコン

ピュータ等に個人の物に関する履歴情報全てが記録されていく事になるのである。RFIDをつけたものを持ち歩いていると、気づかぬうちに何を持っているかをリーダ

図表9 Suicaから読み取った使用状況の例

The screenshot shows a software window titled 'SFCard Viewer' with buttons for '関連サイト' and 'メニュー'. The main display shows a balance of '¥120'. Below this is a table of transactions.

利用年月日	入場駅	出場駅	残額	メモ
2003/03/18	千駄ヶ谷	四ツ谷	¥120	
2003/03/13	東京	千駄ヶ谷	¥250	
2003/03/12	東京	千駄ヶ谷	¥410	
2003/03/11	四ツ谷	千駄ヶ谷	¥570	
2003/03/04	千駄ヶ谷	四ツ谷	¥700	
2003/02/27	千駄ヶ谷	四ツ谷	¥830	
2003/02/23	千駄ヶ谷	新宿	¥960	
2003/02/20	四ツ谷	千駄ヶ谷	¥1,090	
2003/02/19	東京	田町	¥1,220	
2003/02/18	千駄ヶ谷	東京	¥1,350	

科学技術動向研究センターにて作成

で読み取られてしまうかもしれない。パソコンとデジカメとある雑誌というように、複数のものを持ち歩いていると、その情報から個人を簡単に特定できるであろう。それによって個人の行動がすべて、他人に知られてしまう可能性があるが、このような事態は避けなければならない。

このようにRFIDにはプライバシーを侵す危険があるという事を忘れてはならない。

プライバシーの問題だけでなく、RFIDの技術が整備された後で、それをいかに運用していくか、新たな価値やサービス、課題はどのようなもので誰がどう対応していくかについても、十分に議論されなければならないであろう。対象があらゆる“物”である為、関連する省庁は多い。技術規格策定に向け既に活動を開始している総務省、経済産業省のみならず、運

輸・交通に関しては国土交通省、食品の安全性のためのトレーサビリティ確保については農林水産省それぞれが中心に、運用に関する検討を進めていくべきである。医薬品の流通に関してはトレーサビリティの確保に加えて、医療過誤防止を含め厚生労働省からの新たな応用についての提案が望まれる。セキュリティやプライバシーに関しては、警察庁や法務省を中心に法的な側面からも、議論を進めていくべきである。

今後RFID技術が将来的に広く社会に浸透していく為には、技術の規格統一だけでは無く、この技術に対応した社会的な基盤の整備が必要である。このようにRFIDを単に新しい技術として捉えるだけでは、不十分である。今後社会基盤のひとつに発展し、個人の生活環境を含め将来の社会システムを大きく変えて行く可能性があ

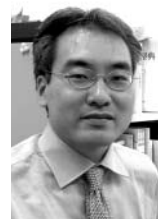
り、今、政府と社会との間で十分な議論が必要となっている。

参考文献

- 1) "2001 National Retail Security Survey Final Report"; University of Florida
http://web.soc.ufl.edu/SRP/NRSS_2001.pdf
- 2) <http://www.autoidcenter.org/main.asp>
- 3) 非接触 IC カード・RFID普及委員会編「非接触 IC カード・RFIDガイドブック2003」
- 4) <http://www.uc-council.org/>
- 5) <http://www.alientechnology.com/>
- 6) 日経コンピュータ 2003. 3 .10 号 pp.17
- 7) 経済産業省ホームページ
http://www.meti.go.jp/policy/media_contents/download-files/1024Manbiki_gaiyou.pdf
- 8) http://www.sony.co.jp/Products/felica/pcrw/sfcard_dl.html

.....

特集3

革新的原子炉としての
高温ガス炉の研究開発動向

環境・エネルギーユニット 大森 良太

1. はじめに

今日、エネルギー市場自由化の進展、分散型電源の普及、欧州を中心とする脱原発や米国での原子力再評価の動きなど、原子力を取り巻く環境は複雑化の様相を呈している。

国際エネルギー機関（IEA）によれば、今後、主にアジア諸国で原子力発電所の新設が予想される反面、欧州などの既存プラントが順次閉鎖されると見込まれることから、不確実性が高いとしながらも、2030年における世界の一次エネルギーに占める原子力の割合は、現在の7%から5%に低下すると評価されている¹⁾。一方で、地球環境問題の解決やエネルギー安定供給の観点から、原子力発電が果たす役割の重要性についても認識されてきている。

このような状況の下、安全性、核拡散抵抗性、経済性、社会受容性等に優れる革新的原子力システムに関する研究開発が世界的に活発化している。革新的原子力システムと言っても多様な原子炉や燃料サイクルが提案され、それらの実用化の目標時期も2010年以前

から2030年頃までと様々であるが、次章で見るように、高温ガス炉に対する関心の高まりが注目される。

現在、商用炉の主流となっている軽水炉は、冷却材、減速材共に水（軽水）を用いる。一方、高温ガス炉は冷却材としてヘリウムガス、減速材として黒鉛を用いる。50年代から研究開発が始まり、80年代までに数機の商用炉が導入されたものの、今日稼働中の商用プラントはない。しかし、高温ガス炉は、①固有安全性が高いこと、②冷却材出口温度が高く、水素製造をはじめとする核熱の様々な利用が可能であること、③エネルギー市場環境の変化への柔軟な対応が可能な中小型モジュール炉に有望な設計がいくつか提案されていることなどから、近年再評価されてきており、次世代型原子炉の有望なオプションの一つとなっている。

わが国では、90年代から日本原子力研究所が高温工学試験研究炉（HTTR）による核熱利用研究を進めており、商用プラントの実現にはまだ多くの課題が残されてい

るものの、その水準は世界トップクラスである。

ただし、近年、工学システムの安全・安心、あるいは、水素エネルギーシステムへの関心が国内外で急速に高まる中、米国やフランスが高温ガス炉を将来型原子炉の有力オプションの一つとして認識し、本格的な研究開発に取り組みつつある。このような状況の下、わが国としても、将来の原子力プラントに対する社会的ニーズを考慮しつつ、高温ガス炉の多様な可能性に着目した研究開発戦略を構築していく必要があると考えられる。

本稿では、次章で革新的原子力システムの研究開発を巡る国内外の動向、および、高温ガス炉への期待の高まりを概観する。3章では高温ガス炉の研究開発の経緯や特徴について触れ、4章では、高温ガス炉の新しい利用形態として特に注目されている水素製造に焦点をあてる。5章では、国内外の主な研究開発・導入プロジェクトを紹介し、6章では、わが国における高温ガス炉研究開発にとっての課題について検討する。

2. 革新的原子力システム開発と高温ガス炉への期待

今日、革新的原子力システムに関する研究開発が国際的に活発化しているが、この動きを先導しているのは米国である。米国エネルギー省（DOE）は、原子力エネル

ギー研究イニシアチブ（NERI）において、革新的原子力システムに関する技術開発を進めてきた。また、DOEの主導で発足した第4世代原子力システム国際フォー

ラム（GIF）^{（注1）}には、図表1に示すように、わが国を含む10カ国（アルゼンチン、ブラジル、カナダ、日本、韓国、フランス、南アフリカ、スイス、イギリス、米

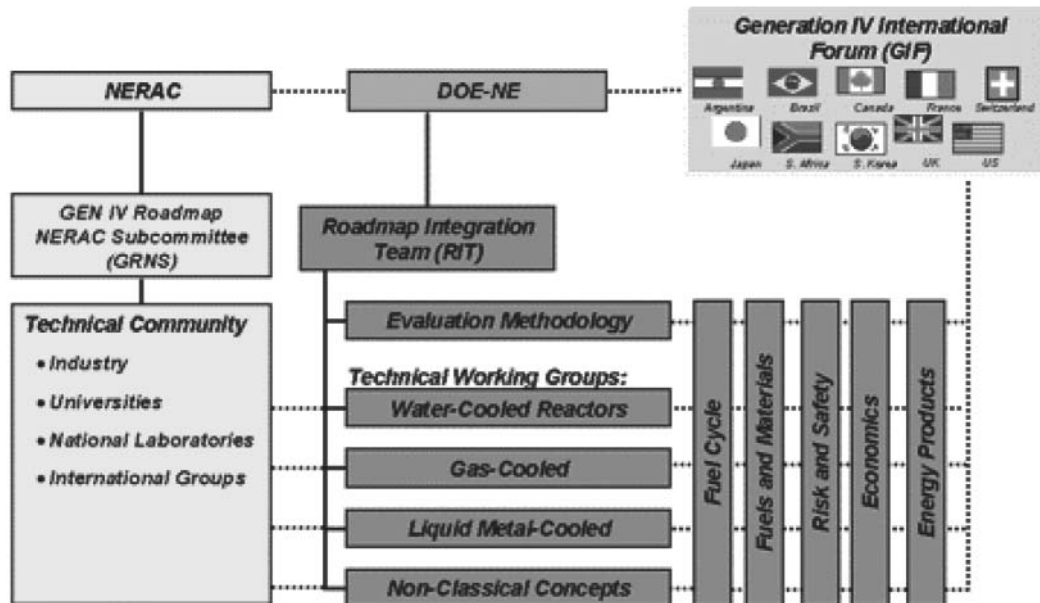
国) が参加しており、2030 年頃の実用化を目途とする第 4 世代原子力システム (Generation IV) の開発に向け、有望な原子力システムの選定や国際共同研究計画の検討作業を実施している。

(注 1) わが国は 2001 年 7 月に GIF の憲章に署名

ここで、第 4 世代原子力システムの概念を説明する。図表 2 に原子炉の第 1 世代から第 4 世代まで

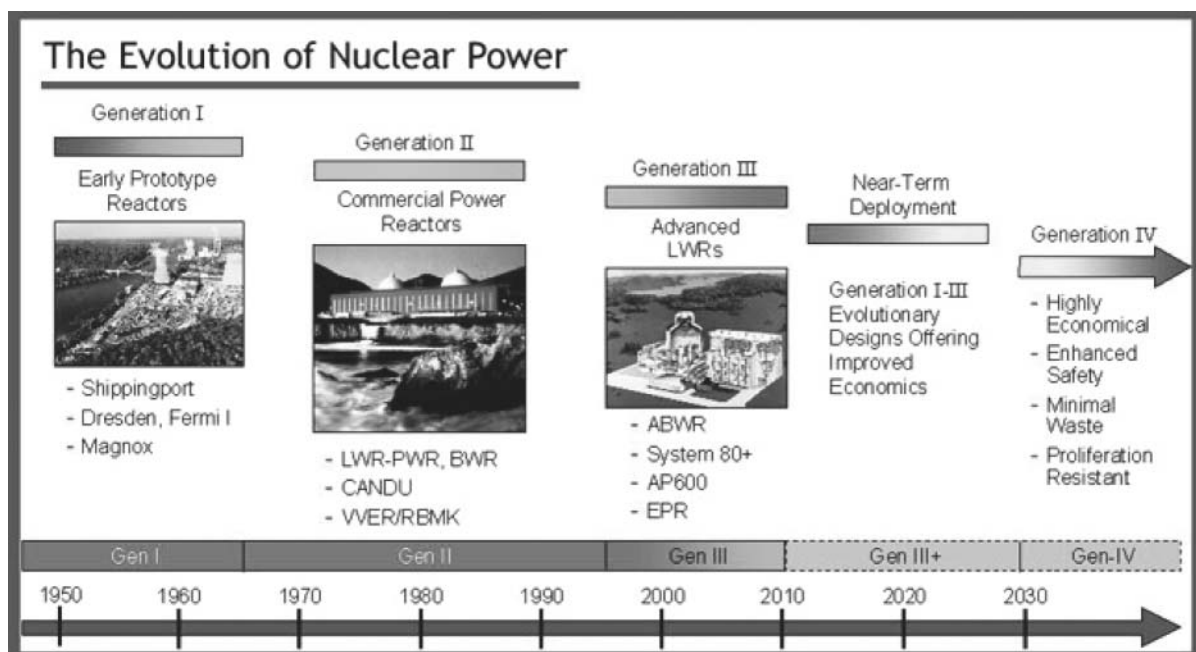
の流れを示す²⁾。50～60年代に開発された初期の軽水炉が第 1 世代、60年代以降に導入され、現在稼動している原子炉の主流となっている軽水炉の PWR と BWR は第 2 世代に位置付けられる。さらに、改良型沸騰水型原子炉 (ABWR)

図表 1 第 4 世代原子力システム国際フォーラム (GIF) の構成



DOE ホームページ²⁾ より転載

図表 2 原子力発電システムの変遷



DOE ホームページ²⁾ より転載

などの先進型軽水炉が第3世代であり、第4世代は概ね2030年ごろの実用化を射程に入れた原子炉群ということになる。さらに、今後研究開発が必要であるが、第4世代より早期（2015年頃）の実用化が期待されるグループを短期導入候補（INTD:International Near Term Deployment）と呼ぶ。

昨年9月、GIFの政策グループ会議が東京で開催され、国際共同研究開発の対象として、以下の6つの第4世代原子力システムを選定した。これを見ると、ガス冷却炉が2つ選ばれている点が特筆される。また、半数にあたる3システムは高速炉となっている。

- ガス冷却高速炉システム
- ナトリウム冷却高速炉システム
- 鉛冷却高速炉システム
- 超臨界圧水冷却炉システム
- 溶融塩炉システム
- 超高温ガス炉システム

また、海外では短中期的な高温ガス炉の商用炉導入計画が進行している。南アフリカのESCOM社が開発しているPBMRや、米ロ

中心となって開発し米国への導入やロシアにおける解体核プルトニウムの処分観点から期待されているGTMHRなどのモジュール型高温ガス炉については、2010年以前の運転開始を目指したプロジェクトが進行中である。これらは世界で最も早期に導入される次世代型炉になる可能性があり、上記のINTDの位置付けとなっている。

これらの第4世代炉および短期導入候補として位置付けられた高温ガス炉システムについては5章で個別に取り上げる。

一方、わが国では2000年の原子力長計³⁾において、革新的原子炉に係わる研究開発について、炉の規模や方式にとらわれず多様なアイデアの活用留意しつつ、産学官が連携して検討することの必要性が述べられている。また、2002年11月には原子力委員会が「革新的原子力システムの研究開発の今後の進め方について」⁴⁾を公表し、わが国の研究開発の現状を整理した上で、その必要性と開発戦略についての考え方を示した。この中で、革新的原子力システムとして9概念（17炉型）が挙げられており、高温ガス炉として

はペブルベッド型高温ガス炉、プリズマスティック型高温ガス炉、大型ヘリウムガス冷却高速炉の3つの炉型が含まれている。

また、文部科学省は2002年度より提案公募型プロジェクト「革新的原子力システム技術開発」（2002年度予算43億円）を開始した。また、経済産業省は2000年度より同じく提案公募型の「革新的実用原子力技術開発」（2002年度予算23億円）を実施している。

また、日本と共にナトリウム冷却高速炉の研究を先導してきたフランスは、実証炉スーパーフェニックスの廃炉措置を決定し、この炉型の実用化を2050年以降に先送りする一方、ガス冷却炉の高い安全性と経済性に注目し、革新炉開発をこれに集中して行う方針を打ち出した⁴⁾。長期的には超高温ガス炉や高温ガス増殖炉の実用化を目指している。日本原子力研究所とフランス原子力庁（CEA）は2002年9月、「原子力開発分野における包括協力協定」を更新したが、新たに高温ガス炉システム開発についての協力が含まれた⁵⁾。

3. 高温ガス炉の研究開発の経緯と特徴

3 - 1

ガス冷却炉開発の経緯

図表3に示すように、現在、稼動している商用原子炉の約8割は軽水炉—加圧水型軽水炉（PWR）と沸騰水型軽水炉（BWR）—であり、冷却材と減速材に共に水を用いる。この他、カナダ型重水炉（CANDU）、炭酸ガス冷却型ガス炉（Magnox および AGR）、黒鉛減速型軽水炉（RBMK）が、それぞれカナダ、英国、ロシアを中心に稼動している。

ガス冷却炉としては、マグネッ

図表3 現在稼動している主な商用炉

炉型	主な国	基数	燃料	冷却材	減速材
加圧水型軽水炉（PWR）	米国、フランス、日本、ロシア	252	濃縮ウラン	軽水	軽水
沸騰水型軽水炉（BWR）	米国、日本	93	濃縮ウラン	軽水	軽水
炭酸ガス冷却型ガス炉（Magnox & AGR）	英国	34	天然ウラン、濃縮ウラン	CO ₂	黒鉛
加圧水型重水炉（CANDU）	カナダ	33	天然ウラン	軽水、重水	重水
黒鉛減速型軽水炉（RBMK）	ロシア	14	濃縮ウラン	軽水	黒鉛

世界原子力協会ホームページ資料⁶⁾を基に作成

クス炉（Magnox）と改良型ガス炉（AGR）が、50年代後半から70年代にかけて、主に英国で導入されてきた。いずれも冷却材は炭酸ガスである。マグノックス炉は天然ウランをマグネシウム合金で被覆した燃料棒を用い、冷却材温度は約400℃程度である。改良型ガス炉は、マグノックス炉の経済性を向上させるため英国が独自に開発した炉型で、ウラン酸化物をステンレスで被覆した燃料棒を用い、冷却材温度を650℃程度になっている。80年代以降は新設されず、既に運転を停止している炉も少なくないが、今日なお、英国の原子炉の大半はAGRである。

一方、本稿で対象としている高温ガス炉は冷却材としてヘリウムを用いる。冷却材温度も800℃程度以上と高い。

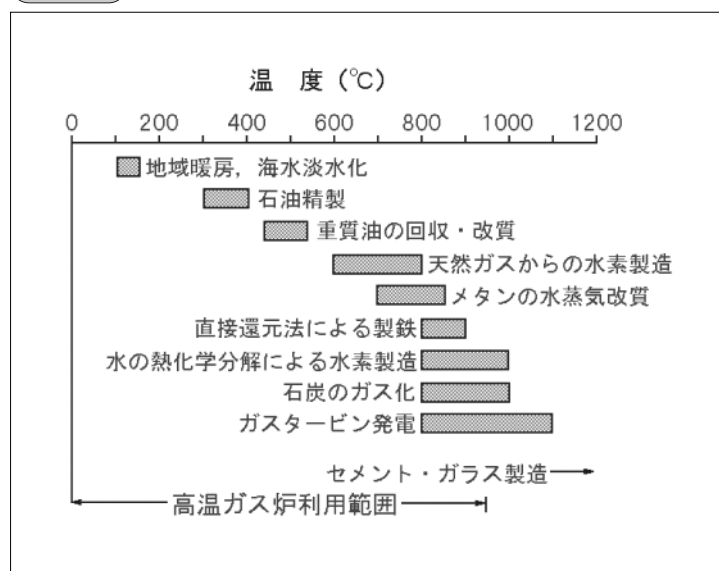
このような高温ガス炉の研究開発⁷⁾は50年代から始まり、60年代を中心にドイツや米国で実験炉や原型炉がいくつか建設されたが、これらはいずれも既に運転を終了している。70年代には米国で商用炉の導入が計画されたが、実現には至らなかった。80～90年代にかけては、高い固有安全性を有するプラントの設計概念が米国やドイツで提案されるとともに、発電以外の用途、例えば、石炭ガス化、アンモニア製造、熱電併給システムなどへの利用に関する研究開発が、ドイツ、日本、ロシアを中心になされてきた。わが国では、高温工学試験研究炉（HTTR）が1998年に臨界に達し、水素製造等の試験研究を実施している。しかしながら、今日、世界で運転中の高温ガス炉商用プラントはない。

3-2

高温ガス炉の特徴

前節で見たように、世界におけるこれまでの高温ガス炉の研究開発・導入は必ずしも順調なもので

図表4 核熱の多角的利用



原子力百科事典ATOMICA⁸⁾より転載

はなかった。この理由としては、燃料製造コストが高いこと、炉心の発熱密度が低いこと、建設費が高くなること、軽水炉が普及したことによる技術のロックイン効果などが挙げられる。しかし、これまでの研究開発成果の蓄積に基づき、固有安全性が高く、経済性に優れ、水素製造をはじめとする核熱の多角的利用の面に優れた新しい高温ガス炉の設計がいくつか提案されている。これが近年の高温ガス炉の再評価の背景となっている。以下では、これらの特徴について説明する。

(1)水素製造などへの核熱の利用可能性

軽水炉の場合、冷却材の原子炉出口温度は330℃程度であるが、高温ガス炉の場合には800～950℃程度になる。このため、ガスタービンを介して発電する場合、発電効率が45～50%にまで達する。

また、最近特に脚光を浴びているのは、その高い冷却材温度を生かした熱源としての利用、特に大規模な水素製造への応用である。原子力による水素製造プロセスとしては、水の電気分解、化石資源の水蒸気改質、水の熱化学分解が

あるが、高温ガス炉を熱源とした水の熱化学分解プロセスは高効率で、さらに、二酸化炭素排出が実質的にゼロとなる大規模水素製造法として注目されている。図表4に示すように、この他、核熱の利用分野としては、製鉄、石炭ガス化、石油精製、海水淡水化、地域暖房などが考えられる。高温ガス炉による水素製造については次章であらためて取り上げる。

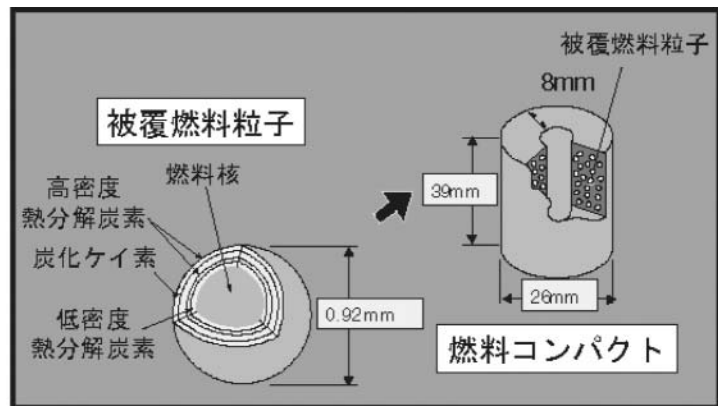
(2)高い固有安全性

高温ガス炉では低濃縮二酸化ウランを炭化ケイ素などのセラミックスで多層に被覆した直径1mm程度の燃料粒子を、ペブルベッド型（球状）またはブロック型に固めて用いる。図表5に日本原子力研究所高温工学試験研究炉（HTTR）で用いられている燃料（ブロック型）の模式図⁹⁾を示す。図中の燃料コンパクトは燃料棒中に封入される。

燃料粒子の被覆セラミックスは耐熱性が高く、1,600℃以上の高温になっても健全性が保たれる。高温ガス炉では、万一、冷却材のヘリウムが失われるような事態が発生しても（減圧事故）、自然放熱による崩壊熱除去のみにより、被覆材の温度がこの温度にまで達

することを防ぐことができ、内部の放射性物質が放出されることはない¹⁰⁾。また、減速材の黒鉛は熱容量が大きいため、事故時のシステム温度の変化が緩慢になり、運転員は時間的余裕をもって適切な措置を講じることができる。さらに、全運転状態を通じて炉は大きな負の温度係数を持つこと、冷却材のヘリウムは化学的に不活性であることも高温ガス炉の安全要因として挙げられる。

図表5 日本原子力研究所高温工学研究施設（HTTR）の燃料



日本原子力研究所ホームページ⁹⁾より転載

(3) 小型モジュール化による経済性の向上とエネルギー市場環境への柔軟な対応

多くの軽水炉プラントは最大出力が100万kW以上である。一方、5章で見るように、高温ガス炉においては出力10～30万kWクラスのモジュール型炉が注目を集めている。一般的にはプラント規模が大きいほど経済性が向上する（スケールメリット）。しかしながら、小型高温ガス炉の場合には、固有安全性の高さに基づく安全シ

ステムの簡素化、ガスタービンの導入による高発電効率の達成を通じて経済性を高めている。

また、今日多くの国々でエネルギー市場の自由化が進展している。これに伴い、特に、独立系発電事業者（IPP）など、中小規模の電力事業者は、電力料金の変動やエネルギー市場の環境変化のリスクにこれまで以上にさらされることとなり、資本回収に長期間を要する大規模プラント（特に固定

費の割合が高い原子力発電所）の建設に踏み切りづらい状況となっている。その結果、初期コストが小さいことから資本回収におけるリスクが小さく、建設するモジュール数を変えることでサイト全体の出力を調整でき将来の環境の変化（電力価格やエネルギー需給）にも柔軟に対応できる小型モジュール炉が注目を集めている。

4. 高温ガス炉による水素製造

現在、燃料電池をはじめとする水素エネルギーシステムに対する期待が高まっているが、その本格的な普及にとっての大きな課題の一つは、燃料となる水素をどのようにして製造するかである。高温ガス炉に対する関心が高まっている大きな理由の一つは、クリーンで経済的な大規模水素製造への応用可能性にある。

現在、工業的に確立している水素製造法は天然ガスなどの化石資源の改質によるものであるが、この場合には製造時に大量の二酸化炭素が排出される。従って、3E問題の解決の観点からは、水やバイオマスからの水素製造法の実用化・普及が望まれる¹¹⁾。特に、高温ガス炉による水の熱化学分解は、大規模でクリーンな水素製造

法として期待されている。

水を熱により直接分解するためには2,500℃以上の高温を必要とする。しかし、いくつかの熱化学反応を組み合わせることにより、800℃程度の熱で水を分解する熱化学サイクルが複数提案されている。この温度領域であれば、高温ガス炉を熱源として用いることができる。

日本原子力研究所はISプロセス

による水の熱分解プロセスの試験研究を実施している¹²⁾。ISプロセスは米国ゼネラル・アトムクス社により考案された手法であり、以下の3つの化学反応（図表6）で構成され、原料水と反応させるヨウ素（Iodine）および硫黄（Sulfur）から生じる化合物をプロセス内部で循環使用することで、外部に有害物質が排出されない工夫がされている。

図表6 ISプロセスによる水の分解プロセス

ブンゼン反応	$2\text{H}_2\text{O} + \text{I}_2 + \text{SO}_2 = 2\text{HI} + \text{H}_2\text{SO}_4$	室温～100℃
ヨウ化水素分解反応	$2\text{HI} = \text{H}_2 + \text{I}_2$	400℃
＋ 硫酸分解反応	$\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$	800℃
<hr/>		
	$\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$	

米ゼネラル・アトムクスの考案による

同研究所では、2001年にISプロセスによる連続水素製造装置（水素製造量毎時50リットル規模）を完成し、試験研究に着手し、2008年頃に、高温工学試験研究炉（HTTR）と連結させる予定である。

米国では、昨年、エネルギー省（DOE）の主導で発足した、政府と自動車メーカーとの技術開発パートナーシップであるFreedomCAR イニシアチブ（2003年度算要求\$150.3M）がスタートしたが、今年2月に発表された2004年度DOE予算案¹³⁾では水素の製造、貯蔵、インフラに関する研究開発を実施するHydrogen Fuelイニシアチブ^{（注2）}が新規に提案され、FreedomCAR イニシアチブと合わせて、\$273Mが要求されている。

（注2）当初はFreedomFuel initiativeとアナウンスされたが、最近ではHydrogen FUEL initiative、または、FreedomCAR initiativeとあわせ、Freedom CAR and FUEL initiativeと呼ばれている。

このHydrogen Fuelイニシアチブの枠組みにおいて、Nuclear Hydrogenイニシアチブ（2003年度算要求\$4.0M）が提案されてい

図表7 主な原子力水素生産方式の現状

原料	供給原子力エネルギー			化石燃料燃焼 水蒸気改質法に 対する比価格*
	エネルギー 形態	対象プラント （温度レベル）	水素製造方法	
水	電気	発電炉	電気分解法	2.5
	熱	高温ガス炉 高温液体金属炉 （800～1000℃）	熱化学法	1.5
化石燃料、 水		Na高速増殖炉 （450～600℃）	水蒸気改質法	0.9

*原研試算（二酸化炭素の処理費は考慮せず）

参考文献¹⁵⁾ から転載（一部省略）

る。熱源としては、高温ガス炉、あるいは、液体金属冷却炉が候補に挙げられており、2015年度の商用規模での実証を目指している¹⁴⁾。

なお、原子力エネルギーによる水素製造法は、上記の高温ガス炉による水の熱化学分解の他にも図表7に示すような方法が提案されている。いずれも、プラント出力の大きさから、再生可能エネルギー等による方法と比べ、大量生産が可能という特色がある^{（注3）}。

（注3）消費地から離れた大規模プラントの場合には水素の輸送コストが問題となる。

例えば、燃料電池実用化戦略研究会は、2020年における燃料電池自動車の期待する導入目標を500万台（累積）としているが¹⁶⁾、こ

れらが全て水素を搭載して走行するようになると、年間60億Nm³超の水素が必要になる¹⁷⁾。一方、高温ガス炉による熱化学分解法、および、軽水炉による電気分解法の場合、出力100万kW当たり、1年間にそれぞれ34億Nm³、17億Nm³の水素が製造可能である¹⁸⁾。従って、数基の原子力プラントで上記の水素需要を満たすことが可能となる。

また、高温ガス炉や高速増殖炉の核熱を従来の天然ガス等の水蒸気改質の熱源として用いる方法は、水の熱化学分解よりも経済性や技術的フィージビリティの観点から早期に導入可能と考えられ、日本原子力研究所と核燃料サイクル機構がそれぞれ中心となって研究開発を進めている。

5. 国内外の研究開発プロジェクト

国内外で進行中の代表的な研究開発および商用炉導入プロジェクトを図表8に示す。稼動中の試験研究炉としてはHTTR（原研）、HTR-10（中）、2010年頃までの導入が計画されている商用炉としてはPBMR（南ア）、GTMHR（米・ロ）、より先の導入を目標とする構想炉として超高温ガス炉VHTR、ガス冷却高速炉GFRなどがある。本章では以下、各プロジェクトの概要をまとめる。

5-1

HTTR（高温工学試験研究炉）（日本）

日本原子力研究所が中心となって研究開発を進めているHTTRは、原子力の非電力分野での用途開発を目的とする試験研究炉として1990年に設置許可を受け、1991年に着工を開始し、1998年11月に初臨界を達成した。燃料要素はブロック型で、冷却材出口温度は850～950℃である。2008年頃に

水素製造装置を接続する予定となっている。

今後は、高性能燃料の照射試験、安全性実証試験、核熱利用試験（水素製造-熱化学法、高温水蒸気電解法など）、先端的基礎研究（セラミックスの照射試験、トリウム回収試験、高温耐熱材料及び高温耐熱計装システムの開発）、水蒸気改質法による水素／メタノール製造システム、などについての研究を進める計画となっている。

また、原研ではわが国独自のモジュール型ガスタービン高温ガス

図表8 主な高温ガス炉開発・導入プロジェクト

	炉の名称	開発推進機関	出力 (MWt/MWe)	燃料	運転年	備考
稼働中の試験 研究炉	HTTR	原研(日)	30/-	UO ₂ (ブロック型)	1998臨界	水素製造、材料開発
	HTR-10	清華大(中)	10/-	UO ₂	2000臨界	発電+重油改質等
短期導入予定の 商用炉	PBMR	ESCOM (南ア)	302/120 (1 Module)	UO ₂ (ペブルベッド型)	2007予定	ガスタービン発電
	GTMHR	GA-Minatom (米・ロ)	600/285 (1 Module)	PuO ₂ (ブロック型)	2009予定	兵器Pu燃焼処理、 ガスタービン発電
		GA(米)	600/285 (1 Module)	U系 (ブロック型)	2010頃	水素製造
将来構想炉	VHTR	原研(日)、 GA(米) 他	未公表	未公表	2020頃	出口ガス温度1000～1500℃、 ZrC被覆燃料
	GCFR	CEA(仏)、 東工大(日)、 MIT(米) 他	例えば600/288、 1400/未公表	Pu系またはU系	2025頃	出口ガス温度850℃、使用 済燃料は再処理サイクル

参考文献¹⁹⁾ から転載

炉GTHTR300のシステム設計も実施している。出力は100～300MWeクラスで2010年代の実証機の導入を目指している。

5 - 2

HTR - 10 (高温ガス実験炉)
(中国)

HTR - 10は中国の清華大学がドイツの技術支援を受けて開発した高温ガス炉(出力10MW)であり、①高温ガス炉の設計、建設、運転についてのノウハウの取得、②実験設備の構築、③固有安全性の実証、④電熱供給技術、ガスタービン技術の試験、⑤高温利用プロセスに関する研究開発、を目的として建設され、2000年12月に臨界に達した。現在、100%の出力に向けた出力上昇試験を実施している。

燃料要素は17%の濃縮ウランを用いたペブルベッド型である。現在は蒸気タービンが用いられているが、将来的にはガスタービンを設置し、直接サイクルガスタービン発電の実証を目指している。

5 - 3

PBMR (ペブルベッド型モジュール高温ガス炉) (南ア)

PBMRは南アフリカ国営電力会社のESCOM社が主体となって開発している小型モジュール炉である。各国が小型モジュール型高温ガス炉の研究開発を推進している中、PBMRは導入に向け最も先行している。

現在、南ア、欧、米の電力会社やメーカーが資本参加し、南アで原型・実証・実用1号炉を兼ねる初号炉の導入およびそれに続く10基程度の実用炉モジュールの増設に向けた計画が進展中である。この計画には日本からも三菱重工(Heガスタービン)や原子燃料工業(燃料製造設備)が技術協力をしている。順調に行けば、着工の可否についての最終判断、南ア規制当局のライセンス発行を経て、2004年にも初号炉の着工が始まり2007年頃運転が開始される予定である。これと並行して、さらに10基の増設も推進される。

一方、約30年ぶりの新規原子炉建設として注目を集めている米国への導入は不透明な情勢となっている。導入を計画していた米国

電力会社のエクセロン社は2001年1月に、原子力規制庁(NRC)に対してライセンス申請計画の説明を開始し、これに呼応して、NRCも予備的な許認可審査に取り掛かった。早ければ2010年までに複数基が導入されるのではないかと期待されたが、2002年4月、エクセロン社は上述の南アでの計画への資本参加からの撤退を表明した。これに伴い、NRCのレビュー作業も停止している状況である。

5 - 4

GTMHR (ブロック型モジュール高温ガス炉)
(米国・ロシア)

GTMHRはロシアおよび米国で導入が計画され、両国を中心とする国際共同研究コンソーシアムが発足している。これには、欧米のメーカーや研究機関に加え、わが国からは富士電機が参加している。ロシアにおいては核兵器の解体により生じる余剰兵器級プルトニウムの処分炉の候補として位置付けられており、一方、米国においては、水素製造への応用も視野に入れ、安全性や経済性に優れた原子炉として見なされている。ロシア国内では2006年、米国では

2007年頃の建設開始を目標に安全審査の準備が進められている。

1 モジュール当たりの出力は286MWeで標準プラントは4モジュールの構成となる。直接サイクルガスタービン発電により、45～50%の高い発電効率が達成される。核兵器解体プルトニウム処分炉としては、1回の燃料装荷・運転で大部分のPu239を消滅可能で、4モジュールプラントでは1年間に約1トンの兵器級プルトニウムを処分できる。

5 - 5

第4世代原子炉

昨年、第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF）は、国際共同研究開発の対象として6つの第4世代原子力システムを選定したが、このうち2システムはガス冷却炉 - VHTR（超高温ガス炉）とGFR（ガス冷却高速炉）である。以下では、主に第4世代原子力エネルギーシステム技術ロードマップ²⁰⁾を基にこれらの炉型のシステム概念を紹介する。

(a) VHTR（超高温ガス炉）

VHTRは冷却材出口温度が1000℃以上の炉であり、最終的には1500℃程度への目標としている。利用形態としては、ISプロセスによる水素製造に力点が置かれている。リファレンスデザインでは出力は600MWth程度、燃料は低濃縮ウラン酸化物のZrC被覆粒子燃料（ブロック型またはペブルベッド型）である。

水素製造プラントとして用いる場合には、中間熱交換器により取り出した熱をISプロセスプラントに導入する。一方、発電炉として用いる場合には、直接サイクルの採用が想定され、発電効率は50%以上と評価されている。いずれの場合も、使用済み燃料をリサイクルしないワンススルーサイクルが想定されている。今後の課題としては、耐熱性の高いZrC被覆燃料、耐熱セラミックス材料、受動的崩壊熱除去システム、中間熱交換器等に関する研究開発が挙げられている。2020年ごろの運転開始を目途に、現在、原研や米国GA社が中心となって研究開発を

進めている。

(b) GFR（ガス冷却高速炉）

GFRはウランの資源利用効率の向上とアクチニド管理を図るためクローズドサイクルを想定したヘリウム冷却高速炉であり、特に仏CEAが本炉型の研究開発重視の姿勢を打ち出している。実用化の目標時期は2025年頃である。

本炉型では、ウラン、プルトニウム、アクチニドのリサイクルが重視され、廃棄物中の長半減期核種の量も最小化される。リファレンスデザインでは出力600MWth/288MWeで冷却材出口温度は850℃である。水素製造を目的とした熱利用も可能であるが、直接サイクルヘリウムガスタービンによる発電が一義的には想定され、発電効率は48%となっている。燃料はcercerと呼ばれるセラミック複合燃料（UPuC/SiC（70%/30%）、約20%Pu含有）が最も有望なオプションとされている。使用済み燃料再処理の方式としては、湿式オプションおよび乾式オプションを含めて今後、検討されることになっている。

6. おわりに

本稿では、短中期の新規導入炉および第4世代原子炉の有力オプションとして急速に関心が高まっている高温ガス炉に焦点をあて、その期待の高まりの現状と国際的な取り組み、原子炉としての特徴、特に注目されている水素製造への利用について述べ、さらに、国内外の主な研究開発・導入プロジェクトを概観した。

高温ガス炉は固有安全性が高く、水素製造をはじめとする核熱の多角的な利用や中小型炉による高効率発電が可能である。このような特徴は、将来社会の原子力システムに対するニーズとも親和するものと考えられる。

今日、各国は高温ガス炉を次世代型原子炉候補として明確に位置付け、本格的な研究開発に取り組みつつある。わが国も将来の原子力プラントに対する社会的ニーズを考慮しつつ、高温ガス炉の多様な可能性に着目した研究開発を推進していくことが重要である。HTTRに続く原型炉、および、小型高効率発電試験炉などの建設についても官民で検討していく必要があろう。

目下、将来の水素エネルギーシステムの普及に伴う膨大な水素需要をどのように満たすかが大きな課題となっているが、高温ガス炉を熱源としたクリーンで大規模な

水素製造が注目されている。これは発電のみに限定されてきた原子力エネルギーの用途を拡大し、エネルギーシステム全体におけるその役割を大きく変える可能性がある。DOEの2004年度予算要求ではHydrogenFuelイニシアチブの一環としてNuclear Hydrogenプロジェクトが新規提案された。わが国においても、高温ガス炉をはじめとする原子炉による水素製造の研究開発プロジェクトの発足が望まれよう。

参考文献

- 1) International Energy Agency, World Energy Outlook2002 (2002)

- 2) DOE ホームページより転載
(<http://gen-iv.ne.doe.gov/>)
- 3) 原子力委員会、原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画、平成12年11月24日
- 4) 原子力委員会研究開発専門部会、革新炉検討会、革新的原子力システムの研究開発の今後の進め方について、平成14年11月7日
- 5) 日本原子力研究所プレス発表、2002年9月20日 (<http://www.jaeri.go.jp/jpn/open/press/2002/020920/>)
- 6) <http://www.world-nuclear.org/info/inf32.htm>
- 7) 原子力百科事典ATOMICA、ガス冷却型原子炉の技術的進展 (03-03-01-01)、<http://mext-atm.jst.go.jp/atomicaf.html>
- 8) 原子力百科事典ATOMICA、高温ガス炉による核熱エネルギー利用の拡大 (03-03-05-01) (<http://mext-atm.jst.go.jp/atomicaf.html>)
- 9) http://httrntsv.oarai.jaeri.go.jp/index_top.html
- 10) 早川均ほか、高温ガス炉の新展開「原子炉特性：固有安全原理を中心として」、日本原子力学会誌、Vol.44、846 (2002)
- 11) 大森良太、化石資源を用いない水素製造技術、科学技術動向、No.19 (2002)
- 12) 日本原子力研究所プレス発表、2001年5月15日 (<http://www.jaeri.go.jp/open/press/2001/010515/index.html>)
- 13) <http://www.mbe.doe.gov/budget/04budget/content/highlite/highlite.pdf>
- 14) DOE ホームページ資料 (<http://nuclear.gov/infosheets/Hydrogen%20J.pdf>)
- 15) 中英昌、浮上する「原子力による水素生産」の夢と課題、原子力eye、Vol.48、No.5、34 (2002)
- 16) 経済産業省燃料電池実用化戦略研究会、燃料電池実用化戦略研究会報告、2001年1月
- 17) 小林紀、水素導入シナリオ、エネルギー資源学会平成14年度エネルギー特別講座「水素エネルギー技術の動向とその導入シナリオ」、2002年11月27日
- 18) 日本原子力産業会議原子力システム研究懇話会、原子力による水素エネルギー、NSA/COMMENTARIES：No.10 (2002)
- 19) 土江保男、関本博、高温ガス炉の新展開「世界における高温ガス炉の歴史」、日本原子力学会誌、Vol.44、840 (2002)
- 20) U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems (2002)

.....

SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

May 2003
(NO.26)

Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and
Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports,
Science and Technology

※このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「報告書一覧 科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

連絡先：〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-3-2
電話 03-3581-0605 FAX 03-3503-3996
URL <http://www.nistep.go.jp>
Email stfc@nistep.go.jp

- ▶ Life Sciences
- ▶ Information & Communication Technologies
- ▶ Environmental Sciences
- ▶ Nanotechnology & Materials
- ▶ Energy
- ▶ Manufacturing Technology
- ▶ Infrastructure
- ▶ Frontier

Science & Technology Trends

科学技術動向

《2003年5月号》

文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター